

УДК 621.372.51.049.774:658.512.26:004.92

А.А. Самуилов, Л.И. Бабак, Ф.И. Шеерман

## «Визуальное» проектирование корректирующих и согласующих цепей для СВЧ МИС

Описаны методика «визуального» проектирования пассивных корректирующих (КЦ) и согласующих цепей (СЦ), а также метод преобразования моделей. Совместно они обеспечивают проектирование КЦ и СЦ непосредственно на монолитных элементах, описываемых сложными моделями. Представлена реализация данного подхода в программе LOCUS, интегрированной с системой проектирования СВЧ-устройств Microwave Office. В качестве примера приведено решение задачи проектирования согласующей цепи на монолитных элементах.

**Ключевые слова:** «визуальное» проектирование, метод преобразования моделей, LOCUS, МИС, СВЧ, корректирующая цепь, согласующая цепь.

При проектировании корректирующих (КЦ) и согласующих цепей (СЦ) для СВЧ полупроводниковых устройств, реализуемых в виде монолитных интегральных схем (МИС), необходимо учитывать потери и паразитные параметры в пассивных элементах. Общеизвестным в настоящее время является следующий подход к проектированию СВЧ МИС [1]. Вначале выбирается или синтезируется первоначальная цепь, использующая идеальные пассивные элементы. Затем по электрическим параметрам идеальных элементов определяются конструктивные параметры (обычно геометрические размеры) соответствующих монолитных интегральных (МИ) элементов. Идеальные элементы в цепи заменяются сложными моделями МИ-элементов (например, в виде эквивалентных схем или электромагнитных моделей). После этого с целью обеспечения требуемых характеристик проводится оптимизация результирующей цепи в пространстве конструктивных параметров МИ-элементов.

Одним из недостатков изложенного подхода является большая трудоемкость. Кроме того, при использовании точных (и соответственно сложных) моделей МИ-элементов оптимизация МИС требует значительных временных затрат и может оказаться неэффективной или вообще невозможной. Наконец, нет гарантии, что первоначально выбранная структура цепи при замене идеальных элементов на реальные сможет удовлетворить поставленным требованиям. Эффективные методики проектирования СВЧ МИС должны учитывать паразитные параметры элементов уже на этапе выбора (синтеза) структуры цепи.

В настоящей работе описана интерактивная процедура «визуального» проектирования монолитных КЦ и СЦ, позволяющая учесть потери и паразитные явления непосредственно при выборе структуры и величин элементов цепи, благодаря этому сокращается трудоемкость и повышается точность проектирования. Процедура основана на предложенном ранее методе преобразования моделей пассивных элементов [2]. Рассмотрена реализация этой процедуры в программе LOCUS, интегрированной с системой проектирования СВЧ-устройств Microwave Office (MWO).

**1. Метод преобразования моделей элементов.** Метод автоматизированного проектирования МИС на основе преобразования моделей [2] состоит в следующем (рис. 1). Вначале по требованиям к МИС выбирается или генерируется исходная цепь на идеальных пассивных элементах (цепь может включать также активные элементы, описываемые  $S$ -параметрами или эквивалентными схемами). Далее по идеальной цепи строится 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.

Кроме моделей МИ-элементов, МИ-цепь содержит также элементы, предназначенные для соединения компонентов МИС между собой, с точками входа, выхода и «землей» – например, отрезки линий передачи, тройники, заземляющие отверстия и др., которые описываются своими моделями. Для удобства идеальную цепь будем называть схемой-прототипом, а полученную путем преобразования идеальной цепи МИ-цепь – схемой, ассоциированной с идеальной цепью.

После преобразования выполняется моделирование ассоциированной МИ-цепи и производится оценка ее характеристик. Если характеристики не удовлетворяют предъявляемым требованиям, то далее в итерационном цикле выполняются следующие действия:

- 1) при оптимизации – изменяются значения элементов идеальной цепи-прототипа;
- 2) при структурном синтезе – выбирается (генерируется) новая структура идеальной цепи – прототипа и значения ее элементов.

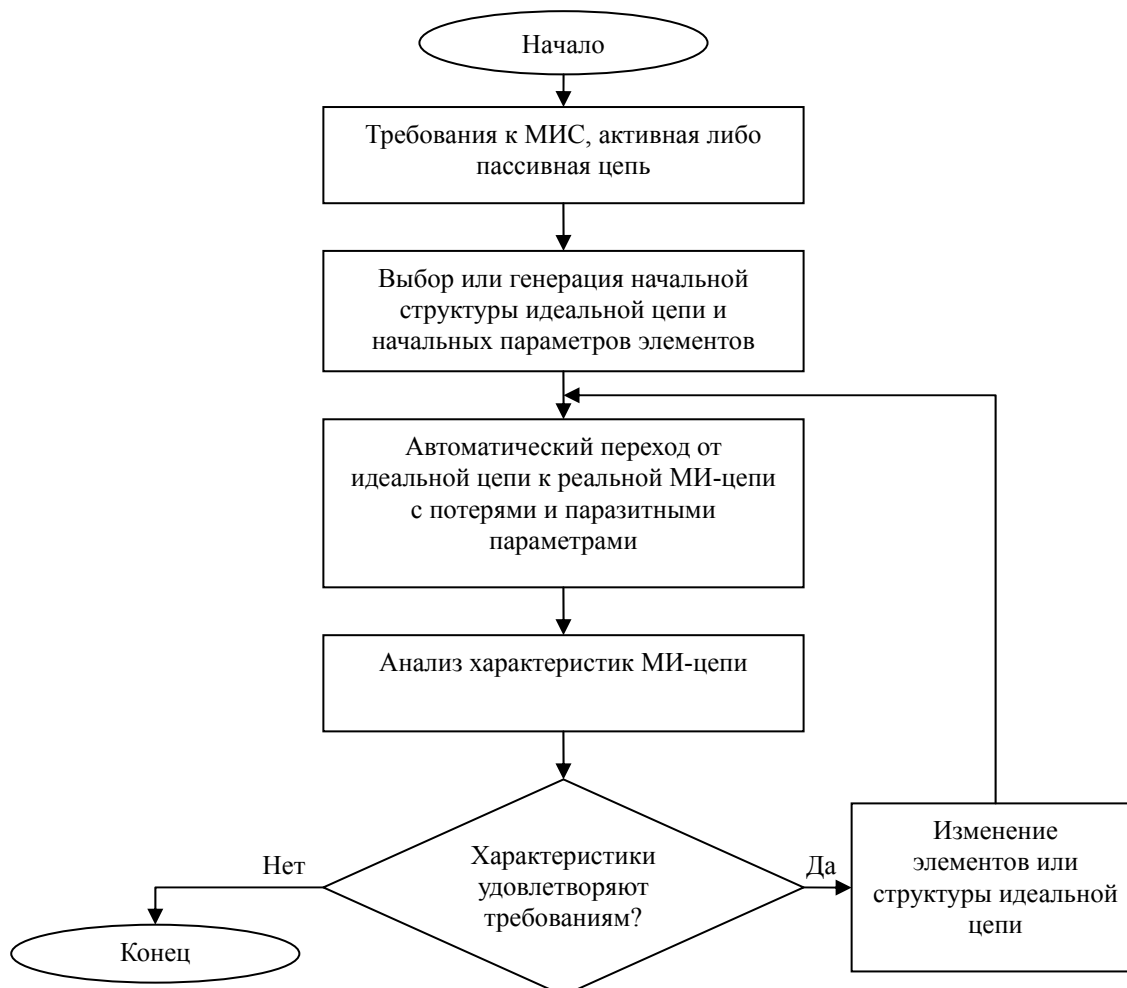


Рис. 1. Схема процесса оптимизации и синтеза МИС на основе преобразования моделей

В обоих случаях целенаправленное изменение элементов или структуры осуществляется на основе формируемой целевой функции, учитывающей характеристики реальной МИ-цепи (ассоциированной схемы) и требования к ней. Однако непосредственно изменяются структура и электрические параметры элементов идеальной цепи-прототипа, структура МИ-цепи и геометрические размеры ее элементов «следят» за идеальной цепью. Таким образом, идеальная цепь служит лишь удобным представлением структуры и основных электрических параметров МИ-цепи.

Если в результате итерационного процесса получена МИ-цепь, удовлетворяющая поставленным требованиям, тогда на заключительном этапе по известным геометрическим размерам элементов составляется топология МИС. Эта операция может быть автоматизирована с помощью процедур генерации топологии, имеющихся в распространенных системах проектирования СВЧ-устройств.

Метод преобразования моделей является достаточно универсальным и позволяет, используя существующие процедуры синтеза цепей на идеальных элементах (методы реальной частоты, систематического и случайного поиска, «визуальный» подход и др.), осуществить синтез устройств на МИ-элементах. При этом могут быть применены любые типы моделей, разрешающие с необходимой точностью описать монолитные элементы – например, модели в виде эквивалентных схем, многомерных полиномов, нейросетей и др., модель должна лишь отвечать требованию достаточного быстродействия.

**2. Методика «визуального» проектирования КЦ и СЦ на идеальных элементах.** Рассмотрим вначале постановку задач проектирования КЦ и СЦ. При проектировании двухполосной КЦ исходной является частотная зависимость импеданса  $Z_0(j\omega)$ , заданная в численном виде на ряде дискретных точек  $\omega_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ) частотного диапазона  $\omega \in [\omega_L, \omega_U]$ ,  $\omega_1 = \omega_L$ ,  $\omega_m = \omega_U$ . Требуется синтезировать двухполосную цепь, воспроизводящую с необходимой точностью зависимость  $Z_0(j\omega) = R_0(\omega) + jX_0(\omega)$  в диапазоне  $[\omega_L, \omega_U]$ . Точность воспроизведения характеристики  $Z_0(j\omega)$  может быть задана путем указания максимально допустимых абсолютных уклонений ( $\Delta R$ ,  $\Delta X$ ) вещественной и мнимой частей импеданса цепи  $Z(j\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$  от исходных зависимостей  $R_0(\omega)$  и  $X_0(\omega)$  в точках  $\omega_k$ :

$$\begin{aligned} R_0(\omega_k) - \Delta R(\omega_k) &\leq R(\omega_k) \leq R_0(\omega_k) + \Delta R(\omega_k); \\ X_0(\omega_k) - \Delta X(\omega_k) &\leq X(\omega_k) \leq X_0(\omega_k) + \Delta X(\omega_k); \quad k = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (1)$$

Неравенства (1) определяют на каждой из частот  $\omega_k$  соответствующие прямоугольные области допустимых значений (ОДЗ) на плоскости импеданса цепи  $Z$ .

При проектировании СЦ задача состоит в синтезе реактивной четырехполосной цепи, реализующей с заданным допуском требуемую частотную характеристику передачи мощности  $G(\omega)$  от генератора с активным сопротивлением  $R_S$  в нагрузку с заданным импедансом  $Z_L(j\omega)$  (рис. 2), причем уровень передаваемой мощности должен быть максимальным. Предполагается, что импеданс согласуемой нагрузки  $Z_L(j\omega)$  задан в численном виде на ряде фиксированных частот  $\omega_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ) рабочего диапазона  $\omega \in [\omega_L, \omega_U]$ ,  $\omega_1 = \omega_L$ ,  $\omega_m = \omega_U$ . Требования к коэффициенту передачи цепи  $G(\omega)$  задаются также численно в виде двухсторонних ограничений, определяющих диапазон возможных значений  $G(\omega)$  на частотах  $\omega_k$ :

$$G^-(\omega_k) \leq G(\omega_k) \leq G^+(\omega_k), \quad k = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где  $G^-(\omega_k)$  и  $G^+(\omega_k)$  – граничные значения коэффициента передачи  $G(\omega_k)$  на частотах  $\omega_k$ .

Известно, что для реактивной цепи (рис. 2) коэффициенты отражения  $m_1$  во входном (1–1') сечении и  $m_2$  в выходном (2–2') сечении равны между собой и однозначно связаны с коэффициентом передачи  $G$ :

$$m_1 = m_2 = m; \quad (3)$$

$$G = 1 - m^2, \quad (4)$$

где

$$m_1 = \left| \frac{R_S - Z_{in}^*}{R_S + Z_{in}} \right|; \quad m_2 = \left| \frac{Z_L - Z_{out}^*}{Z_L + Z_{out}} \right|; \quad (5)$$

$Z_{in}$  и  $Z_{out}$  – соответственно входной и выходной импедансы цепи.

Учитывая (3)–(5), нетрудно показать, что ОДЗ на частотах  $\omega_k$ , соответствующие неравенствам (2), представляют собой круговые области на плоскости импеданса  $Z = Z_{out}$  [3]

Если КЦ (СЦ) входит в состав СВЧ полупроводникового устройства (например, усилителя), ОДЗ ее входного иммитанса на ряде фиксированных частот рабочего диапазона определяются на основе декомпозиционного метода синтеза [4], исходя из совокупности требований к характеристикам этого устройства.

Проектирование КЦ и СЦ основано на методе «областей» [3]. При этом вначале на каждой из частот  $\omega_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ) рабочего диапазона строятся области допустимых значений (ОДЗ)  $E_k$  на плоскости импеданса цепи  $Z$ . Далее синтезируется двухполосная цепь таким образом, чтобы ее импеданс  $Z(j\omega)$  на частотах  $\omega_k$  попадал в соответствующие ОДЗ  $E_k$ :

$$Z(j\omega_k) \in E_k, \quad k = \overline{1, m}. \quad (6)$$

При проектировании СЦ двухполосная цепь выбирается в виде реактивного четырехполосника, нагруженного на сопротивление генератора  $R_S$  (см. рис. 2).

Интерактивная «визуальная» процедура проектирования КЦ и СЦ на идеальных элементах [1, 2] включает два шага.

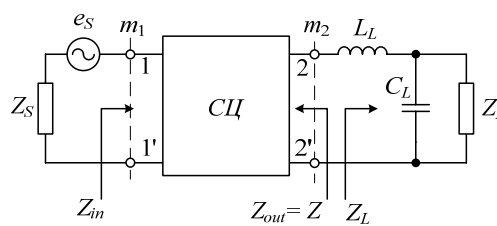


Рис. 2. Задача согласования комплексной нагрузки с активным сопротивлением генератора

1) Выбор структуры КЦ (СЦ), исходя из расположения ОДЗ на плоскости импеданса. При этом пользователь на экране компьютера одновременно наблюдает сами ОДЗ, а также библиотеку типовых структур цепей и их годографов импеданса или проводимости. В результате пользователь выбирает несколько структур цепей, годограф которых может попасть в заданные области.

2) Расчет элементов КЦ (СЦ) с выбранной структурой. Пользователь может управлять формой годографа, перемещая с помощью «мыши» опорную точку годографа на одной из частот и изменяя с помощью тьюнера величины некоторых (управляемых) элементов цепи. Таким образом он добивается попадания точек годографа на других частотах в соответствующие ОДЗ. Если этого удастся добиться, то задача проектирования СЦ выполнена, в противном случае необходимо выбрать другую структуру цепи.

**3. Методика «визуального» проектирования КЦ и СЦ на монолитных элементах.** При реализации «визуального» проектирования КЦ или СЦ, используемых в СВЧ МИС, одновременно выполняется моделирование цепи на идеальных элементах и соответствующей цепи на МИ-элементах [5]. На экране компьютера вместе с ОДЗ отображаются одновременно два взаимосвязанных годографа – идеальной цепи  $Z^I(j\omega)$  и соответствующей ей МИ-цепи  $Z^M(j\omega)$ . Пользователь, управляя формой годографа идеальной цепи  $Z^I(j\omega)$ , добивается попадания в ОДЗ точек годографа монолитной цепи  $Z^M(j\omega)$ :

$$Z^M(j\omega_k) \in E_k, \quad k = \overline{1, m}. \quad (7)$$

Таким образом, учитывается влияние потерь и паразитных параметров в МИ-элементах.

Особенностью проектирования монолитных СЦ является то, что, при наличии потерь в цепи отсутствует однозначная связь между коэффициентами отражения на входе  $m_1$ , выходе  $m_2$  и коэффициентом передачи  $G$ . Размещение точек годографа выходного сопротивления МИ-цепи  $Z^M(j\omega_k)$  в ОДЗ  $E_k$  позволяет точно контролировать модуль коэффициента отражения  $m_2$ , однако не гарантирует получения необходимых уровней согласования на входе  $m_1$  и коэффициента передачи  $G$ .

Для преодоления указанной трудности предлагается рассчитывать и отображать в режиме реального времени частотные зависимости характеристик  $m_1$ ,  $m_2$  и  $G$ . Таким образом, на этапе выбора значений элементов СЦ пользователь может визуально контролировать эти характеристики наряду с формой годографа  $Z^M(j\omega)$ . Если полученные величины  $m_1$ ,  $G$  монолитной цепи не устраивают пользователя, он может дополнительно подстроить элементы идеальной цепи, наблюдая частотные кривые этих характеристик. С учетом этого процедура «визуального» синтеза монолитной СЦ по ОДЗ сводится к следующим шагам:

1. Выбор структуры идеальной СЦ, исходя из расположения ОДЗ на плоскости иммитанса. При этом пользователь на экране компьютера одновременно наблюдает сами ОДЗ, а также библиотеку типовых структур цепей и их годографов сопротивления или проводимости. В результате пользователь выбирает несколько структур цепей, годограф которых может попасть в заданные области.

2. Определение значений элементов цепи. При этом пользователь добивается попадания годографа монолитной цепи в ОДЗ, управляя значениями идеальных элементов.

3. Если полученные характеристики  $m_1$ ,  $G$  монолитной цепи не устраивают пользователя, он может дополнительно подстроить элементы идеальной цепи, наблюдая частотные зависимости этих характеристик.

Представленная процедура осуществлена в новой версии программы LOCUS, интегрированной совместно с САПР MWO.

**4. Реализация метода преобразования моделей в программе LOCUS.** Рассмотрим реализацию метода преобразования моделей в программе LOCUS [6]. При этом полагается, что выбор (синтез) и моделирование идеальной цепи осуществляются в программе LOCUS, а построение топологии и моделирование соответствующей МИ-цепи – в системе MWO с использованием библиотек моделей монолитных элементов для конкретной технологии МИС. Такой подход является удобным в связи с тем, что для построения топологии и моделирования МИС могут использоваться эффективные встроенные алгоритмы в системе MWO, а также готовые модели монолитных элементов в специальных библиотеках.

Для осуществления проектирования СВЧ МИС (например, монолитных КЦ и СЦ) в программе LOCUS были разработаны специальные модули TRANSLOCUS и TRANSFORMER. Посредством данных модулей и осуществляется взаимодействие среды моделирования MWO и программ синтеза (рис. 3). Рассмотрим схему взаимодействия более подробно.

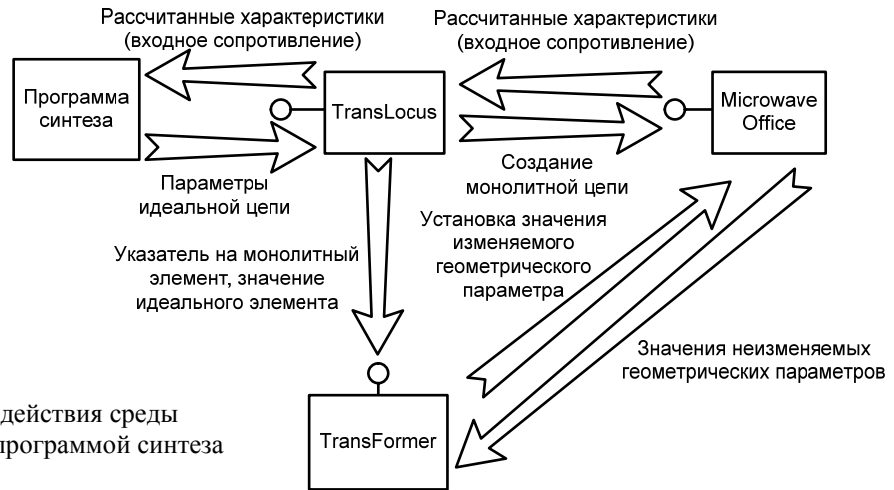


Рис. 3. Схема взаимодействия среды моделирования MWO с программой синтеза

Из программы синтеза в модуль TRANSLOCUS поступают параметры идеальной цепи: структура цепи и номиналы элементов. Предварительно пользователь должен выбрать для каждого идеального элемента его физическую реализацию. Например, для идеальной индуктивности это может быть реализация в виде круглой или квадратной спирали либо отрезка МПЛ.

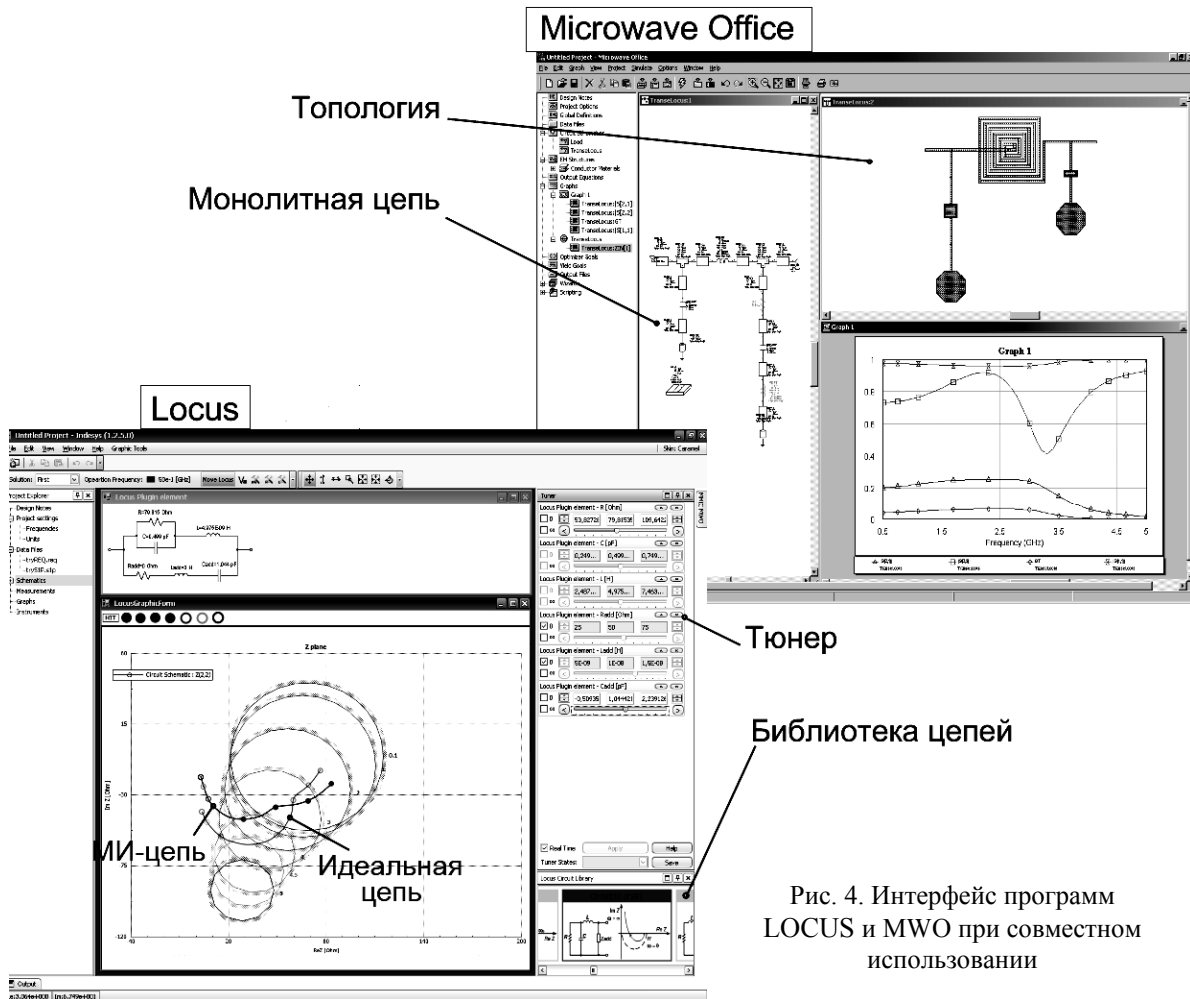


Рис. 4. Интерфейс программ LOCUS и MWO при совместном использовании

Модуль TRANSLOCUS, используя технологию взаимодействия приложений COM-Automation, вызывает среду MWO и формирует в ней монолитный аналог цепи, используя вместо идеальных элементов соответствующие модели монолитных элементов. Назовем эти элементы изменяемыми (имеется в виду, что их параметры будут изменяться вместе с изменением элементов идеальной це-

пи). Кроме того, автоматически добавляются соединительные линии, различные неоднородности (тройники, повороты), заземляющие отверстия и т.д. – неизменяемые элементы.

По значениям идеальных элементов модуль TRANSLOCUS вычисляет геометрические параметры МИ-элементов. Для этого он вызывает универсальный модуль TRANSFORMER. На вход последнего модуля поступает указатель на МИ-элемент в среде MWO и значение соответствующего ему идеального элемента. Модуль по указателю считывает неизменяемые геометрические параметры МИ-элемента, с использованием формул преобразования вычисляет значение изменяемого геометрического параметра и устанавливает рассчитанное значение в среде MWO. В результате формируется первоначальная топология монолитной цепи, которая отображается в MWO.

После получения топологии модуль TRANSLOCUS запускает процедуру моделирования МИ-цепи в среде MWO (рис. 4). В результате вычисляются и выводятся в виде графиков необходимые характеристики монолитной цепи. Рассчитанные значения импеданса МИ-цепи передаются в программу синтеза.

**5. Описание процесса проектирования КЦ и СЦ на монолитных элементах.** Схема процесса проектирования КЦ и СЦ на монолитных элементах при помощи программы LOCUS и САПР MWO представлена на рис. 5. В этой схеме блоки, ограниченные пунктирной линией, обозначают операции, выполняемые самим пользователем; блоки, ограниченные одной сплошной линией, показывают операции, осуществляемые автоматически программой LOCUS; блоки, ограниченные сплошной жирной линией, обозначают операции, автоматически выполняемые в среде моделирования MWO. Рассмотрим схему проектирования монолитных КЦ и СЦ более подробно.

На первом шаге (блок 1) необходимо задать требования к проектируемым КЦ и СЦ. Согласно «визуальной» методике требования должны быть представлены в виде ОДЗ входного иммитанса цепи. В зависимости от типа проектируемого устройства ОДЗ могут быть получены несколькими способами.

Если проектируется линейное активное устройство (например, малошумящий усилитель), то ОДЗ иммитанса или коэффициента отражения КЦ (СЦ) предварительно вычисляются на заданных фиксированных частотах рабочего диапазона по требованиям к характеристикам этого устройства с помощью специализированных программ (AMP или REGION [7]). Полученные ОДЗ в виде стандартных файлов формата \*.rgn вводятся в программу LOCUS.

При проектировании нелинейных активных устройств (например, усилителей мощности, смесителей или умножителей частоты) ОДЗ могут быть построены на основании нагрузочных диаграмм активного элемента, полученных путем экспериментальных измерений или компьютерного моделирования. Нагрузочные диаграммы представляют собой линии равных значений характеристик устройства (например, коэффициента передачи в режиме большого сигнала, выходной мощности, КПД, интермодуляционных искажений и т.д.) на комплексной плоскости коэффициента отражения (иммитанса) нагрузки. Полученная информация об ОДЗ в виде файла \*.rgn передается в программу LOCUS.

Введенные ОДЗ отображаются на плоскости иммитанса или коэффициента отражения (блок 2) в программе LOCUS. Далее разработчик указывает класс схем (сосредоточенные, распределенные или смешанные) и просматривает библиотеку типовых схем программы LOCUS. Сопоставляя форму годографа цепи с расположением ОДЗ, он выбирает структуру КЦ или СЦ (блок 3) на идеальных элементах без потерь и задает начальную конфигурацию МИ-цепи (блок 4). Как уже отмечалось, при проектировании СЦ выбирается схема в виде реактивной четырехполюсной цепи, нагруженной на резистор.

После выбора схемы идеальной КЦ (СЦ), запускается среда моделирования MWO и в ней автоматически строится соответствующая монолитная цепь (блок 5), при этом геометрические параметры монолитной цепи оказываются связанными при помощи формул преобразования со значениями элементов монолитной цепи.

Далее (блок 6) разработчик может указать в программе LOCUS конкретную реализацию элементов  $R$ ,  $L$ ,  $C$  в монолитной цепи (например, реализацию индуктивности  $L$  в виде отрезка МПЛ, квадратной спиральной катушки индуктивности и т.д.). При этом у пользователя есть возможность изменить параметры монолитного элемента. Например, для спиральной индуктивности он может установить ширину проводников и ширину зазора, а длина будет вычисляться автоматически. Для конденсатора он может установить ширину, длина будет вычисляться и т.д.

Таким образом, формируется топология монолитной цепи, которая отображается в MWO. Далее пользователь может сам, непосредственно в среде MWO, отредактировать конфигурацию МИ-цепи: добавить или удалить соединительные элементы (соединительные линии, тройники, повороты и т.д.) или изменить их параметры.

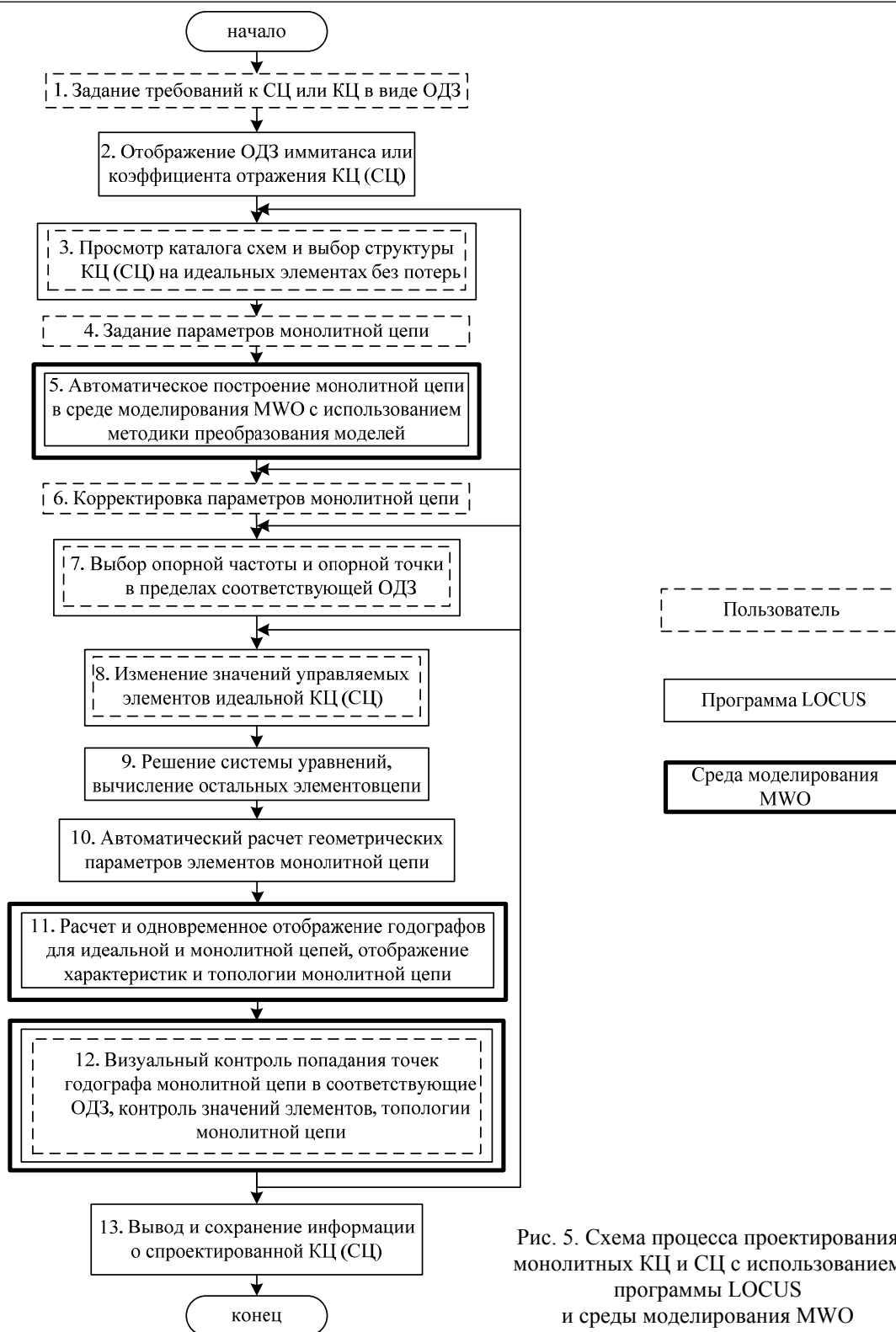


Рис. 5. Схема процесса проектирования монолитных КЦ и СЦ с использованием программы LOCUS и среды моделирования MWO

Затем разработчик приступает к определению значений элементов цепи. Для этого на первом шаге для цепи на идеальных элементах он указывает опорную частоту и опорную точку (т.е. значение иммитанса или коэффициента отражения цепи на опорной частоте) в пределах соответствующей ОДЗ (блок 7). В качестве опорной частоты целесообразно выбрать частоту, на которой ОДЗ имеет наименьшие размеры, в этом случае легче исследовать влияние выбора опорной точки на форму годографа. Если размеры ОДЗ на всех частотах примерно одинаковы, за опорную можно взять верхнюю граничную частоту рабочего диапазона.

Затем в программе LOCUS устанавливаются начальные значения управляемых элементов идеальной цепи и производится вычисление остальных элементов цепи в результате решения системы уравнений (блоки 8, 9). Геометрические параметры монолитной цепи при этом автоматически рассчитываются с использованием формул преобразования (блок 10).

После этого выполняется расчет годографов иммитанса для идеальной и монолитной цепей. Входной иммитанс идеальной цепи вычисляется в программе LOCUS. Входной иммитанс монолитной цепи автоматически рассчитывается в среде MWO и возвращается в программу LOCUS. Оба годографа отображаются на экране монитора вместе с ОДЗ. В среде MWO одновременно отображаются текущая топология, а также выбранные дополнительные характеристики монолитной цепи (коэффициент передачи, коэффициенты отражения по входу и выходу для СЦ) (блок 11).

Пользователь визуально проверяет, достигнута ли цель проектирования, т.е. находятся ли все точки годографа для монолитной цепи в соответствующих ОДЗ, является ли удовлетворительной топология цепи (например, все ли элементы цепи имеют практически реализуемые размеры), удовлетворяют ли поставленным требованиям дополнительные характеристики цепи (блок 12).

Если цели проектирования не достигнуты, то, изменяя значения управляемых элементов с помощью движков тюнера, разработчик изменяет форму годографа для идеальной цепи, а вместе с тем годограф и для монолитной цепи, и пытается добиться попадания точек последнего в нужные области (возврат к блоку 8).

Если путем изменения управляемых элементов достичь цели проектирования не удастся, возможен выбор новой опорной точки и (или) новой опорной частоты, либо выбор другой схемы идеальной цепи (возврат к блокам 7 и 3). Кроме того, пользователь может изменить параметры монолитной цепи: задать другие типы монолитного элемента, выбрать другие значения неизменяемых геометрических параметров (возврат к блоку 6). Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будут выполнены все поставленные требования к проектируемой цепи.

После получения нужных характеристик информация о спроектированной КЦ (СЦ) выводится на экран и может быть сохранена в виде файла отчета (блок 13). Кроме того, схема и топология монолитной цепи могут быть сохранены в файле формата среды MWO. На этом процесс проектирования КЦ (СЦ) завершается.

#### 6. Пример: «визуальное» проектирование согласующей цепи на монолитных элементах.

Рассмотрим решение тестовой задачи Фано [8]: синтезировать реактивную цепь для согласования трехэлементной  $RLC$ -нагрузки (см. рис. 2) с резистивным сопротивлением генератора  $R_S$  в полосе частот  $f = 0,5 \dots 5$  ГГц (в задаче Фано 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. Сопротивление генератора  $R_S$  может варьироваться для улучшения характеристик цепи.

Спроектируем СЦ на монолитных элементах при использовании  $0,2$  мкм GaAs-технологии ED02AH фирмы OMMIC (Франция). Основной целью проектирования монолитной СЦ будем считать получение равномерного и максимально возможного коэффициента передачи в полосе согласования.

Решение данной задачи для реактивной СЦ на идеальных элементах с помощью «визуального» подхода приведено в [9]. В этом случае была задана величина модуля коэффициента отражения  $m \leq m_{\max} = 0,4$ , это соответствует минимальному уровню передачи по мощности  $G \geq G_{\min} = 0,84$ . Схема полученной СЦ на идеальных элементах и ее основные параметры представлены соответственно на рис. 6, а и в таблице.

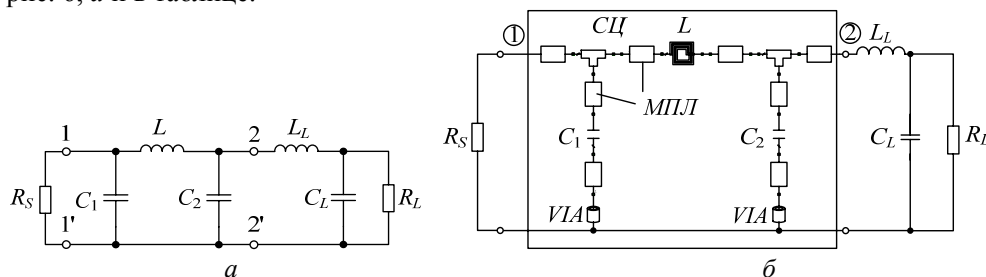


Рис. 6. Согласующая цепь на идеальных (а) и монолитных (б) элементах

Рассчитанные ОДЗ на плоскости  $Z$ , а также годографы импеданса полученной идеальной цепи и соответствующей ей монолитной СЦ для этого случая показаны на рис. 7, а (ОДЗ построены на ряде фиксированных частот полосы пропускания, цифры рядом с областями обозначают значения частот в ГГц). Здесь точки годографа сопротивления идеальной цепи находятся внутри ОДЗ, однако годограф МИ-цепи на некоторых частотах располагается вне допустимых областей.



Параметры согласующей цепи

Цепь	Значения элементов	$G_{\min}$	$\Delta G$	$m_{1\max}$	$m_{2\max}$	Габариты
Идеальная (см. рис. 6, а)	$R_s = 110 \text{ Ом}; C_1 = 0,243 \text{ пФ}; C_2 = 0,61 \text{ пФ}; L = 4,726 \text{ нГн}$	0,8499	0,0508	0,387	0,387	—
Монолитная (см. рис. 6, б)	$R_s = 105 \text{ Ом}; C_1 = 0,126 \text{ пФ}; C_2 = 0,43 \text{ пФ}; L = 4,38 \text{ нГн}$	0,687	0,12	0,465	0,427	710×480

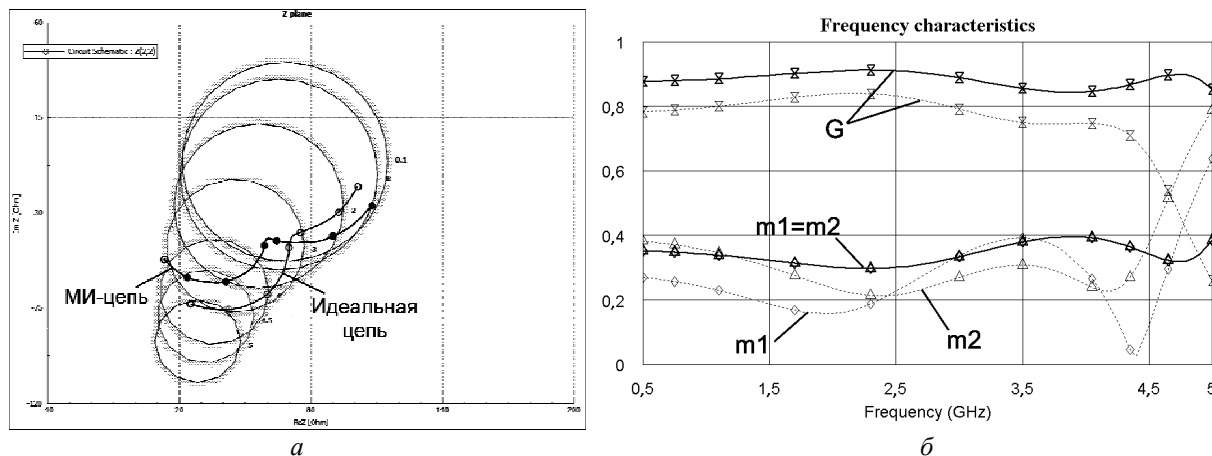


Рис. 7. Характеристики СЦ при расчете на идеальных элементах: а – ОДЗ и годографы импеданса идеальной и МИ-цепи; б – частотные характеристики коэффициента передачи

На рис. 7, б представлены частотные зависимости характеристик  $m_1$ ,  $m_2$  и  $G$  идеальной цепи (сплошные линии) и соответствующей МИ-цепи (штрихпунктирные линии). Как видно, коэффициент передачи идеальной реактивной СЦ равномерен и удовлетворяет поставленному ограничению. Однако коэффициент передачи МИ-цепи существенно падает на верхних частотах.

Для перехода от СЦ на идеальных элементах к ее соответствующей монолитной реализации необходимо запустить пакет MWO с подключенной библиотекой элементов ED02AH и задать режим проектирования монолитных цепей в программе LOCUS. При синтезе СЦ вместо идеальных элементов используются квадратные спиральные индуктивности и МДМ-конденсаторы. В состав СЦ входят также соединительные линии, тройники и сквозные заземляющие отверстия (см. рис. 6, б).

Меняя положение годографа идеальной цепи, добьемся попадания в ОДЗ точек годографа МИ-цепи (рис. 8, а). После этого элементы идеальной цепи были немного подстроены при визуальном наблюдении в режиме реального времени частотной характеристики коэффициента передачи МИ-цепи  $G$ . В результате неравномерность частотной характеристики удалось уменьшить, а коэффициент передачи МИ-цепи – повысить (рис. 8, б). Заметим, что в рассматриваемом случае характеристика  $G$  идеальной цепи имеет «предыскажения» (подъем  $G$  вблизи верхней частоты полосы согласования).

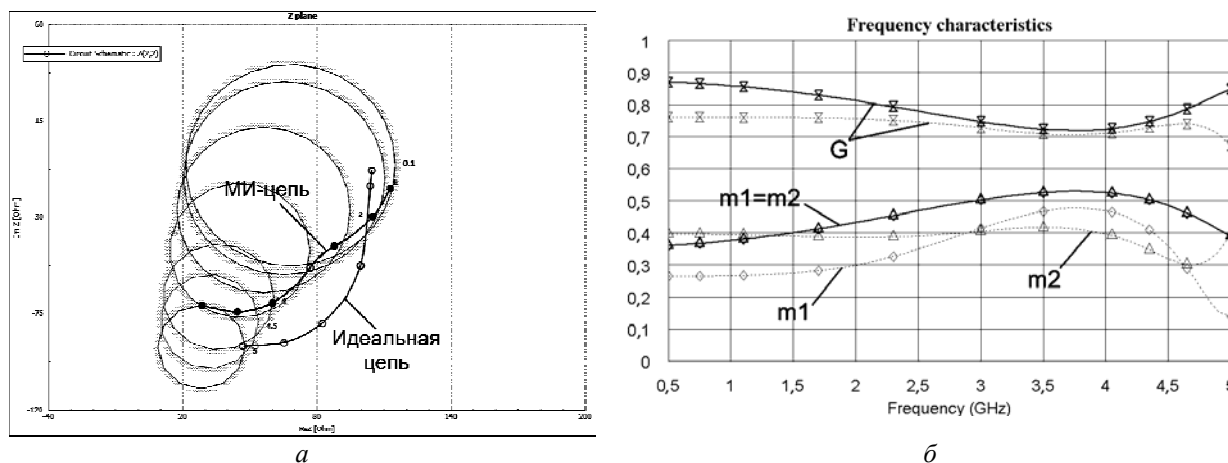


Рис. 8. Характеристики СЦ при расчете на монолитных элементах: а – ОДЗ и годографы импеданса идеальной и МИ-цепи; б – частотные характеристики коэффициента передачи

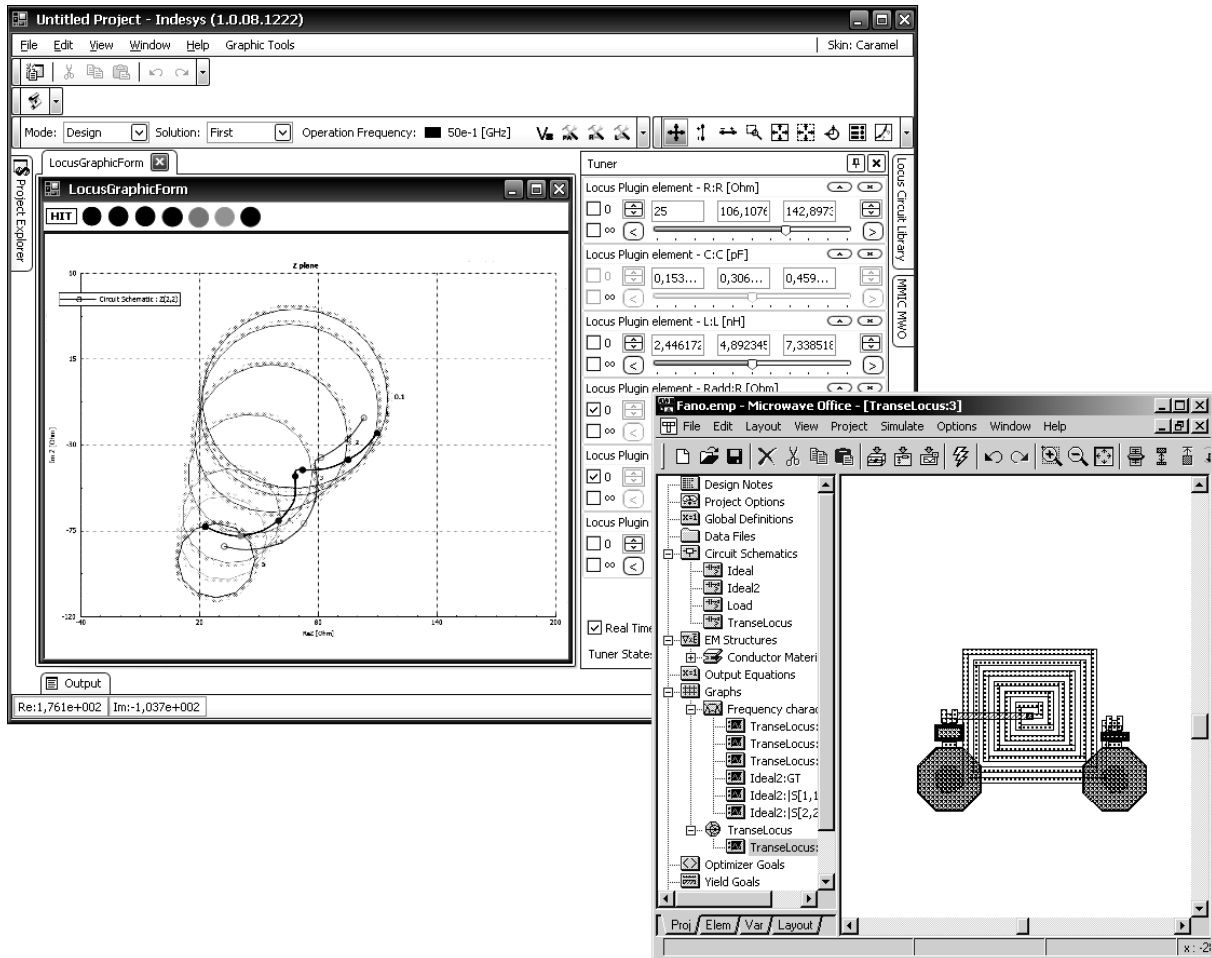


Рис. 9. Вид интерфейса программ LOCUS и MWO при «визуальном» проектировании СЦ на монолитных элементах

Параметры рассчитанной монолитной СЦ представлены в таблице, там же указаны значения элементов идеальной цепи-прототипа (см. рис. 6, а).

В процессе выбора элементов идеальной цепи одновременно осуществляется отображение в реальном времени изменения топологии МИ-цепи (рис. 9). После получения результирующей топологии монолитной цепи ее необходимо только отредактировать для включения в общую топологическую схему проектируемой МИС.

**Заключение.** В статье представлена реализация в новой версии программы LOCUS процедуры «визуального» проектирования КЦ и СЦ для СВЧ монолитных интегральных устройств, основанной на методе преобразования моделей. При использовании «визуального» подхода проектировщик может непосредственно контролировать как структуру, так и значения всех элементов цепи, что позволяет получить практически реализуемые схемы. Более того, возможно оценить реализуемость КЦ или СЦ уже на начальном этапе проектирования.

Применение метода преобразования моделей при «визуальном» проектировании КЦ или СЦ разрешает в режиме реального времени оценить электрические характеристики монолитной цепи с учетом паразитных эффектов, а также особенности топологии и габариты. Интеграция программы LOCUS совместно с САПР MWO позволила использовать встроенные в эту САПР модели МИ-элементов и алгоритмы моделирования, а также инструменты отображения топологии. Это значительно повышает эффективность проектирования КЦ и СЦ для СВЧ МИС.

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.B37.21.0345), «Микроэлектроника» (П669, 16.740.11.0092, 14.740.11.1136, 14.B37.21.0462) и «Проведение исследований коллективами НОЦ по направлению «Микроэлектроника» (14.740.11.0135).

*Литература*

1. Шеерман Ф.И. «Визуальное» проектирование согласующих цепей для СВЧ монолитных интегральных устройств / Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак // 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. 131–132.
2. Бабак Л.И. Синтез СВЧ монолитных интегральных устройств на основе преобразования моделей пассивных элементов // 18-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМи-Ко'2008). Севастополь, 8–12 сентября 2008 г.: матер. конф. – Севастополь: Вебер, 2008. – Т. 1. – С. 129–130.
3. Бабак Л.И. Синтез согласующих цепей и цепей связи транзисторных широкополосных усилителей по областям иммитанса // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40, № 10. – С. 1550–1560.
4. Babak L.I. Decomposition synthesis approach to design of RF and microwave active circuits // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. (Dig.). – Arizona, USA: Phoenix, 2001. – Vol. 2. – P. 1167–1170.
5. Шеерман Ф.И. Интегрированная среда «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей монолитных СВЧ-устройств / Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, Д.А. Зайцев // Известия Том. политех. ун-та. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 166.
6. Шеерман Ф.И. LOCUS-MMIC – интегрированная среда «визуального» проектирования монолитных корректирующих и согласующих цепей / Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, Д.А. Зайцев // Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития». – Томск: В-Спектр, 2007. – Ч. 2. – С. 154.
7. Бабак Л.И. Программы «визуального» проектирования транзисторных СВЧ-усилителей / Л.И. Бабак, М.В. Черкашин, А.Ю. Поляков и др. // 15-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005): матер. конф.: в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2005. – Т. 2. – С. 425–426.
8. Фано Р. Теоретические ограничения полосы согласования произвольных импедансов: пер. с англ.; под ред. Г.И. Слободенюка. – М.: Сов. радио, 1965. – 72 с.
9. Самуилов А.А. Программа «визуального» проектирования корректирующих и согласующих цепей LOCUS на базе среды Indesys // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 2(26), ч. 2. – С. 119–126.

**Самуилов Александр Андреевич**

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) ТУСУРа

Тел.: 8-923-415-92-62

Эл. почта: samuilovaa@gmail.com

**Бабак Леонид Иванович**

Канд. тех. наук, зам. директора НОЦ «Нанотехнологии», доцент каф. КСУП ТУСУРа

Тел.: +7 (382-2) 41-47-17

Эл. почта: leonid.babak@rambler.ru

**Шеерман Федор Иванович**

Канд. техн. наук, доцент каф. КСУП

Тел.: +7-913-805-94-54

Эл. почта: sfi1493@ms.tusur.ru

Samuilov A.A., Babak L.I., Sheerman, F.I.

**«Visual» design of correction and matching networks for MMICs**

The «visual» design technique as well as model transformation method are described. Jointly, these techniques provide the design of correction and matching networks directly on MMIC elements characterized by complicated models. The techniques are implementation in the software LOCUS integrated with commercial CAD tool Microwave Office. As an example, the design of matching network on MMIC elements is demonstrated.

**Keywords:** «visual» design, model transformation method, LOCUS, MMIC, microwave, correction network, matching network.