

Я. С. Ткачук; С. Е. Фурса, к. т. н., доц.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО N-КАСКАДНОГО ОБОБЩЁННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИММИТАНСА

В работе разработана математическая модель многопараметрического обобщённого преобразователя иммитанса, образованного комбинацией трёхполюсников. Проверка адекватности математической модели показала, что она является корректной, а её использование для расчёта разных видов информационных устройств, образованных каскадным соединением трёхполюсников, целесообразно.

Ключевые слова: обобщённый преобразователь иммитанса, полевой транзистор, трёхполюсник, многоэлектродная униполярная полупроводниковая структура.

Введение

Стремительное развитие систем диагностики и контроля, а также их отдельных элементов, обусловленное растущим спросом на них в различных отраслях, привело к необходимости поиска новых технических решений их построения. Одним из путей решения этой проблемы является использование безиндуктивных цепей [1]. Для улучшения характеристик таких цепей широко используют активные устройства, работа которых базируется на усилительных свойствах активного элемента (чаще всего транзистора). Альтернативным путем построения таких цепей является использование идеальных или близких к ним активных устройств обобщенных преобразователей иммитанса (преобразователей сопротивления или проводимости). По определению [2], обобщенным преобразователем иммитанса (ОПИ) называют четырехполюсник, входной (выходной) иммитанс которого зависит от иммитанса нагрузки (генератора). Если преобразованный иммитанс ОПИ является функцией нескольких преобразуемых иммитансов, то такой преобразователь называют многопараметрическим ОПИ_N. Фактически многие параметрические ОПИ являются многофункциональными элементами, которые позволяют разрабатывать на их основе различного рода как аналоговые, так и цифровые устройства, например, переключатели, генераторы, преобразователи, активные фильтры и др. Для проектирования информационных устройств на базе многопараметрических ОПИ_N необходимы математические модели, которые бы учитывали особенности этих элементов.

Цель и задачи исследования

Многопараметрические ОПИ_N хорошо зарекомендовали себя при построении радиочастотных датчиков [3]. Но вопрос чувствительности таких датчиков, их частотные свойства, интенсивность действия информационного параметра на первичные измерительные преобразователи недостаточно исследованы или рассмотрены лишь частично [4], поэтому целью работы является аналитическое описание основных параметров ОПИ_N, определение зависимости их преобразованной проводимости как от количества каскадов N, так и от параметров каждого отдельного каскада. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель многопараметрического ОПИ_N на основе N-каскадного соединения трёх электродных униполярных полупроводниковых структур путем определения параметров не определенной иммитансной матрицы такого ОПИ_N;
- оценить адекватность разработанной математической модели многопараметрического N-каскадного ОПИ_N.

Обоснование необходимости разработки математической модели многопараметрического ОПИ_N

Для описания многопараметрических ОПИ_N эффективна определенная система параметров [5], важным преимуществом которой является ее связь с параметрами иммитансной W-матрицы зависимого четырехполюсника, используемого в качестве ОПИ_N (1). Это позволяет выполнять имитационное моделирование процессов исследуемых элементов в современных пакетах программ, таких как: AWR Design Environment, которые работают именно с иммитансными и волновыми матричными параметрами.

$$[W] = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где W_{11} , W_{12} , W_{21} , W_{22} – параметры иммитансной матрицы.

Любой квазилинейный N-полюсник также однозначно описывают неопределённой иммитансной матрицей:

$$[W_N] = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & \dots & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & \dots & W_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{N1} & W_{N2} & \dots & W_N \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Вышеупомянутая система параметров удовлетворяет требования полноты и объективности:

1. Преобразованный иммитанс $W_{вых}$ (W_{ex}), который является функцией нескольких параметров и зависит от ряда значений преобразуемых иммитансов:

- при прямом преобразовании $W_{ex,j} = T_{ij}(W_{Hi})$;
- при обратном преобразовании $W_{вых,j} = T_{ij}(W_{Gi})$.

2. Коэффициент преобразования иммитанса – T , который является функцией преобразуемых иммитансов и неопределенной иммитансной матрицы четырехполюсника:

$$T = F(W_H, W_G, [W]). \quad (3)$$

3. Инвариантный коэффициент устойчивости K_c , который с одной стороны характеризует запас устойчивости ОПИ_N, а с другой – позволяет оценить возможности ОПИ_N при реализации на его клеммах отрицательного сопротивления, что обеспечивает ему широкие функциональные возможности при создании новых видов информационных устройств. Данный коэффициент позволяет количественно оценить потенциальную неустойчивость и для ненагруженного четырехполюсника его описывают выражением:

$$K_c = (2 \operatorname{Re} W_{11} \operatorname{Re} W_{22} - \operatorname{Re}(W_{12} W_{21})) / |W_{12} W_{21}|.$$

В случае, когда четырехполюсник является нагруженным, инвариантный коэффициент устойчивости должен учитывать, кроме параметров неопределенной матрицы четырехполюсника, еще и сопротивление нагрузки:

$$K_{c.вн} = (2 \operatorname{Re}(W_{11} + W_{\Gamma}) \cdot \operatorname{Re} W_{22} - \operatorname{Re}(W_{12} \cdot W_{21})) / |W_{12} \cdot W_{21}|. \quad (4)$$

4. Частота, соответствующая пределу области потенциальной неустойчивости ОПИ_N, и является предельной частотой $f_{\Gamma} (K_c = 1)$.

5. Одним из требований, которые предъявляются к обобщённым преобразователям иммитанса (ОПИ_N), является стабильность коэффициента преобразования. Нестабильность этого коэффициента принято характеризовать чувствительностью к изменению параметров ОПИ_N $S_{\alpha_i}^T$, которая получила название «качество» ОПИ_N [6]. Чем меньше чувствительность ОПИ_N, тем выше его качество:

$$S_{\alpha_i}^T = \frac{\partial T}{\partial \alpha_i} \div \frac{\alpha_i}{T}; \quad (5)$$

где α_i – физический параметр ОПИ_N.

6. ОПИ_N может как усиливать сигнал, так и вносить угасание. Количественно это свойство ОПИ_N характеризуют максимально достижимым коэффициентом передачи по мощности четырехполюсника на грани устойчивости K_{ms}

$$K_{ms} (K_c = 1) = \left| \frac{W_{21}}{W_{12}} \right|. \quad (6)$$

7. В случае, когда ОПИ_N является потенциально неустойчивым ($K_{c.вн} < 1$), на его клеммах может быть реализован отрицательный действительный иммитанс $\operatorname{Re} W_{\max}^{(-)}$, наличие которого свидетельствует о расширенных функциональных возможностях ОПИ_N. Максимально достижимый отрицательный действительный иммитанс:

при прямом преобразовании

$$\operatorname{Re} W_{\text{ex.max}}^{(-)} = W_{12} W_{21} \left| \frac{(1 - K_{c.вн})}{2 \operatorname{Re} W_{22}} \right|; \quad (7)$$

– при обратном преобразовании

$$\operatorname{Re} W_{\text{вых.max}}^{(-)} = W_{12} W_{21} \left| \frac{(1 - K_{c.вн})}{2 \operatorname{Re} W_{11}} \right|. \quad (8)$$

8. На входных $\operatorname{Re} W_{\text{ex.max}}^{(-)}$ и выходных $\operatorname{Re} W_{\text{вых.max}}^{(-)}$ клеммах ОПИ_N величина этого иммитанса может отличаться, что свидетельствует о его невзаимных свойствах и оценивается коэффициентом невзаимности K_H .

$$K_H = \frac{\operatorname{Re} W_{\text{ex.max}}^{(-)}}{\operatorname{Re} W_{\text{вых.max}}^{(-)}}. \quad (9)$$

– для устойчивого ОПИ_N $K_H (K_c > 1) = |W_{21} / W_{12}|^2 = K_{ms}^2$;

– для потенциально неустойчивого ОПИ_N $K_H (K_c < 1) = \operatorname{Re} W_{22} / \operatorname{Re} W_{11}$.

9. В частотном диапазоне происходит изменение $\operatorname{Re} W_{\max}^{(-)}$. Частота, которая соответствует

максимальному значению $\text{Re}W_{max}^{(-)}$ при постоянном значении преобразуемого иммитанса, называется оптимальной частотой преобразования f_{opt} .

$$f_{opt} = \left(\frac{\partial \text{Re}W_{max}^{(-)}}{\partial f} = 0 \right). \quad (10)$$

10. Параметры иммитансной окружности:

– радиус $\rho_{вых} = |W_{12} \cdot W_{21}| / 2 \cdot \text{Re}(W_{11} + W_G)$,

– активная составляющая координаты центра иммитансной окружности $\text{Re}W_{вых.0} = \text{Re}W_{22} - \text{Re}(W_{12} \cdot W_{21}) / 2 \text{Re}(W_{11} + W_G)$.

Математическая формализация составляющих элементов матрицы WN позволяет определить и количественно оценить параметры (3) – (10).

Разработка математической модели многопараметрического ОПИ_N, образованного комбинацией трёхполосников

Самым простым многопараметрическим ОПИ_N, который может быть базовым звеном более сложных ОПИ_N, является ОПИ_N на базе трёхполосника. Для разработки математической модели датчика на основе многокаскадного соединения многопараметрических ОПИ_N в качестве граничных условий считаем:

- ОПИ_N реализуется на базе квазилинейных активных трёхполосников [7, 8], которые описывают y -матрицей проводимости;
- каждый каскад многопараметрического ОПИ_N является двухпараметрическим заземленным ОПИ_N;
- двухполосники, реализующие преобразуемые иммитансы $W_{Г}$, являются пассивными;
- входной W_{11} и выходной W_{22} иммитансы каждого каскада многопараметрического ОПИ_N должны иметь значение больше нуля, а передаточные иммитансы W_{12} и $W_{21} \neq 0$;
- N -каскадное соединение таких многопараметрических ОПИ_N может быть представлено в виде обобщенной структурной схемы (рис. 1), которая не зависит от физического механизма работы активных приборов.

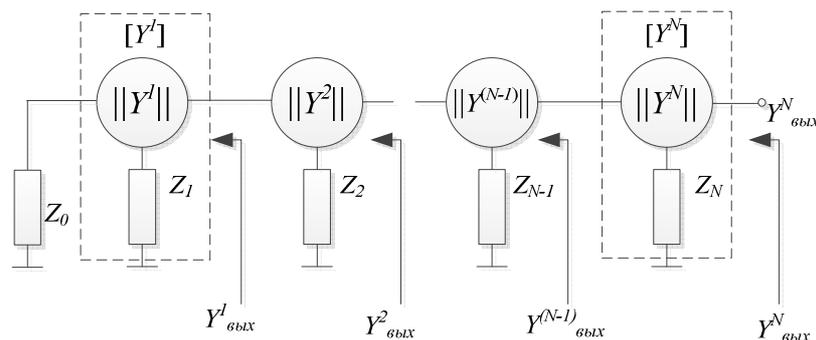


Рис. 1. N -каскадное соединение многопараметрических ОПИ_N

Для обобщенных преобразователей иммитанса, независимо от количества каскадов, алгоритм построения математической модели одинаков. Для упрощения понимания разработаем математическую модель для двухкаскадного трехпараметрического ОПИ_N. Структурная схема такого многопараметрического ОПИ_N приведена на рис. 2.

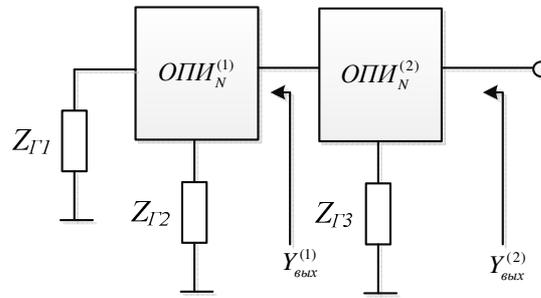


Рис. 2. Структурная схема двухкаскадного трёхпараметрического ОПИ_N

Каждый каскад такого соединения можно описать $[Y_i]$ – матрицей, зависимой от параметров $[y_i]$ – матрицы активного четырёхполюсника и преобразуемых импедансов $Z_{(i-1)}$ и Z_i , используя соотношение [5].

$$\begin{aligned} Y_{11}^i &= (y_{11}^i + Z_i \Delta y_i) / K_i, & Y_{12}^i &= (y_{12}^i - Z_i \Delta y_i) / K_i, \\ Y_{21}^i &= (y_{21}^i - Z_i \Delta y_i) / K_i, & Y_{22}^i &= (y_{22}^i + Z_i \Delta y_i) / K_i, \end{aligned} \quad (11)$$

где: $K_i = 1 + Z_i \sum y_i$; $\sum y_i = y_{11}^i + y_{12}^i + y_{21}^i + y_{22}^i$; $\Delta y_i = y_{11}^i \cdot y_{22}^i - y_{21}^i \cdot y_{12}^i$.

Результирующую адмиттансную матрицу двухкаскадного трёхпараметрического ОПИ_N находят путем перехода от системы Y-параметров к A-параметрам передачи, используя общеизвестные формулы перехода [6]:

$$[A_\Sigma] = \begin{bmatrix} A_{11\Sigma} & A_{12\Sigma} \\ A_{21\Sigma} & A_{22\Sigma} \end{bmatrix} = [A^{(1)}] \times [A^{(2)}] = \begin{bmatrix} \frac{\Delta Y^{(2)} + Y_{12}^{(1)} \cdot Y_{12}^{(2)}}{Y_{21}^{(1)} \cdot Y_{21}^{(2)}} & \frac{Y_{12}^{(1)} + Y_{11}^{(2)}}{Y_{21}^{(1)} \cdot Y_{21}^{(2)}} \\ \frac{\Delta Y^{(2)} \cdot Y_{11}^{(1)} + \Delta Y^{(1)} \cdot Y_{12}^{(2)}}{Y_{21}^{(1)} \cdot Y_{21}^{(2)}} & \frac{\Delta Y^{(1)} + Y_{11}^{(1)} \cdot Y_{11}^{(2)}}{Y_{21}^{(1)} \cdot Y_{21}^{(2)}} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $\Delta Y^{(1)} = Y_{11}^{(1)} \cdot Y_{22}^{(1)} - Y_{12}^{(1)} \cdot Y_{21}^{(1)}$, $\Delta Y^{(2)} = Y_{11}^{(2)} \cdot Y_{22}^{(2)} - Y_{12}^{(2)} \cdot Y_{21}^{(2)}$ – определители адмиттансных матриц первого и второго каскадов ОПИ_N соответственно.

Используя обратные преобразования, переходим к адмиттансной матрице двухкаскадного трёхпараметрического ОПИ_N:

$$[Y_\Sigma] = \begin{bmatrix} Y_{11\Sigma} & Y_{12\Sigma} \\ Y_{21\Sigma} & Y_{22\Sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta Y^{(1)} + Y_{11}^{(1)} \cdot Y_{11}^{(2)}}{Y_{12}^{(1)} + Y_{11}^{(2)}} & - \frac{(\Delta Y^{(1)} - Y_{11}^{(1)} \cdot Y_{12}^{(1)}) \cdot (\Delta Y^{(2)} - Y_{11}^{(2)} \cdot Y_{12}^{(2)})}{Y_{21}^{(1)} \cdot Y_{21}^{(2)} \cdot (Y_{12}^{(1)} + Y_{11}^{(2)})} \\ - \frac{Y_{21}^{(1)} \cdot Y_{21}^{(2)}}{Y_{12}^{(1)} + Y_{11}^{(2)}} & \frac{\Delta Y^{(2)} + Y_{12}^{(1)} \cdot Y_{12}^{(2)}}{Y_{12}^{(1)} + Y_{11}^{(2)}} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Преобразованный адмиттанс двухкаскадного трёхпараметрического ОПИ_N определяют выражением:

$$Y_{\text{вых.2}} = Y_{22}^{(2)} - \frac{Y_{12}^{(2)}Y_{21}^{(2)}}{Y_{11}^{(2)} + Y_{\text{вых.1}}}, \quad (14)$$

где

$$Y_{\text{вых.1}} = Y_{22}^{(1)} - \frac{Y_{12}^{(1)}Y_{21}^{(1)}}{Y_{11}^{(1)} + 1/Z_{\Gamma 1}}. \quad (15)$$

Аналитические зависимости (13) – (15) образуют математическую модель многопараметрического двухкаскадного ОПИ_N, являются наглядными и эффективными при расчете различных видов информационных устройств, создаваемых каскадным соединением трёхполосников. Разработанная математическая модель описывает зависимость преобразованной проводимости многокаскадного ОПИ_N как от количества каскадов N, так и от значений преобразованных сопротивлений ($Z_{\Gamma 1} \dots Z_{\Gamma N}$) и от параметров отдельных каскадов $[y_i]$ и позволяет исследовать его свойства при использовании любого вида квазилинейного трёхполосника вне зависимости от диапазона частот.

Оценка адекватности математической модели

Проверка корректности разработанной математической модели двухкаскадного многопараметрического ОПИ_N проведена с использованием разработанной в [9] схемы трехпараметрического двухкаскадного ОПИ_N (рис. 3) путем сопоставления результатов расчета и имитационного моделирования. Схема трехпараметрического двухкаскадного ОПИ_N образована на основе двух каскадов многопараметрических ОПИ_N, в которых в качестве базовых трёхполосников использованы полевые транзисторы VT1 типа NE4210S01 и VT2 типа BF513, включенные по схеме с общим стоком.

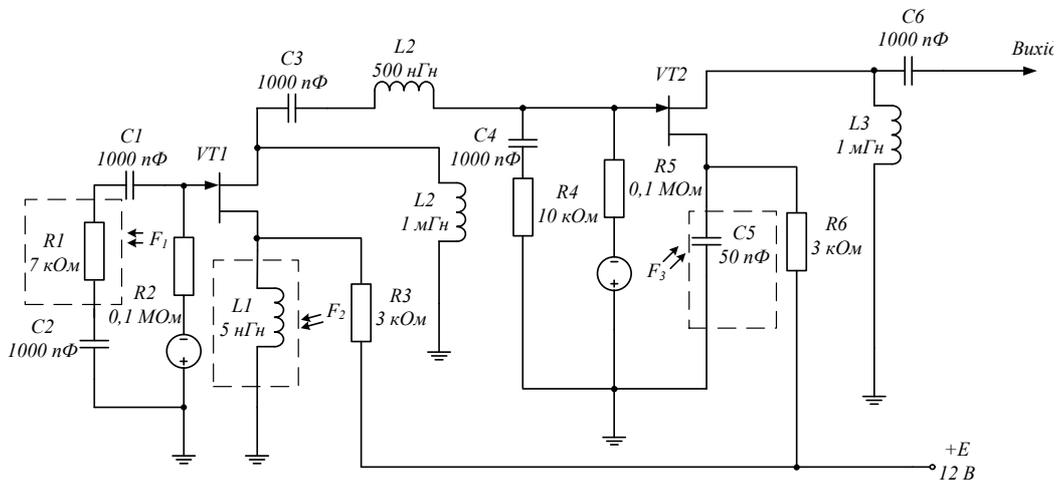


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема трёхпараметрического двухкаскадного ОПИ

Между затвором и общей шиной транзистора NE4210S01 включен резистивный первичный измерительный преобразователь (ПИП) $Z_{\Gamma 1} = R1$; между стоком этого транзистора и общей шиной включен индуктивный $Z_{\Gamma 2} = j\omega L_1$; между стоком и общей шиной транзистора BF513 включен емкостный ПИП $Z_{\Gamma 3} = 1/j\omega C_5$.

Преобразованный адмиттанс трёхпараметрического двухкаскадного ОПИ_N с учетом выражений (11), (14) и (15) будет иметь вид:

$$Y_{\text{вых.2}} = \frac{y'_{22} + Z_{\Gamma 3} \cdot \Delta y'}{Z_{\Gamma 3} \cdot \sum y' + 1} - \frac{(y'_{12} - Z_{\Gamma 3} \cdot \Delta y') \cdot (y'_{21} - Z_{\Gamma 3} \cdot \Delta y')}{(Z_{\Gamma 3} \cdot \sum y' + 1)^2} \cdot \left[\frac{y'_{11} + Z_{\Gamma 3} \cdot \Delta y'}{Z_{\Gamma 3} \cdot \sum y' + 1} + \frac{y_{22} + Z_{\Gamma 2} \cdot \Delta y}{Z_{\Gamma 2} \cdot \sum y + 1} - \frac{(y_{12} - Z_{\Gamma 2} \cdot \Delta y) \cdot (y_{21} - Z_{\Gamma 2} \cdot \Delta y)}{(Z_{\Gamma 2} \cdot \sum y + 1)^2} \cdot \left(\frac{y_{11} + Z_{\Gamma 2} \cdot \Delta y}{Z_{\Gamma 2} \cdot \sum y + 1} + \frac{1}{Z_{\Gamma 1}} \right) \right]. \quad (16)$$

Результаты имитационного моделирования и расчета частотных зависимостей преобразованной проводимости датчика приведены на рис. 4 а. Сравнение результатов моделирования и расчета показали расхождения их значений не более, чем на 0,5 %. Максимальное отрицательное значение реальной составляющей выходного адмитанса $\text{Re}W^{(-)}_{\text{вых. max}}$ составляет -0,0023 См (рис. 4 а), а погрешность между результатами моделирования и расчета данного параметра не превышает 0,42%.

Частота, соответствующая максимальному значению $\text{Re}W^{(-)}_{\text{вых. max}} = 0,0023$ См при постоянном значении преобразуемых иммитансов, является оптимальной частотой преобразования $f_{\text{opt}} = 175$ МГц. Погрешность по данному параметру составляет 0,57%.

Следующий параметр, по которому проводилась проверка корректности разработанной математической модели, – это прямой коэффициент преобразования T_K . Данный коэффициент является комплексной величиной и определяется как $T_K = Y_{\text{вых.2}} / Y_{\Gamma 1}$, где $Y_{\Gamma 1} = 1/Z_{\Gamma 1}$. Результаты имитационного моделирования и расчета приведены на рис. 4 б.

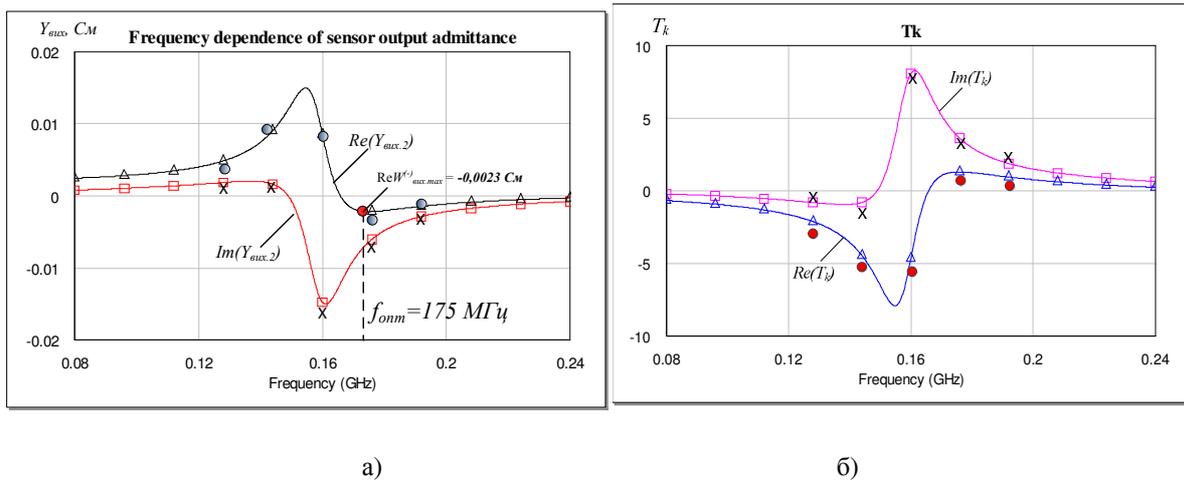


Рис. 4. Зависимости преобразованного адмитанса $Y_{\text{вых.2}}$ (а) и коэффициента преобразования T_k (б) в диапазоне частот: «—» - имитационное моделирование; «xxx» та «•••» - расчёт

Расхождение результатов для действительной составляющей коэффициента прямого преобразования T_K в диапазоне частот от 0,08 до 0,24 ГГц не превышает 3,22%, а мнимой составляющей – 2,97%.

Инвариантный коэффициент устойчивости K_c является одним из главных параметров ОПИ_N. Величины находятся в пределах интервала (-1; +∞). Активный четырехполюсник является потенциально устойчивым, если $K_{c.вн} > 1$ и потенциально неустойчивым при $K_{c.вн} < 1$. Границе потенциальной устойчивости соответствует значение $K_{c.вн} = 1$. Расчет инвариантного коэффициента устойчивости проводили по выражению (2) для нагруженного четырехполюсника. Как показывает рис. 5а, двухкаскадный многопараметрический ОПИ_N является потенциально неустойчивым четырехполюсником в диапазоне частот от 165,8 МГц. На данной частоте числовое значение максимально достижимого коэффициента передачи мощности на границе устойчивости K_{ms} (рис. 5 б) составляет 1,645. Расхождение между

результатами моделирования и расчета инвариантного коэффициента устойчивости составляет 1,1%.

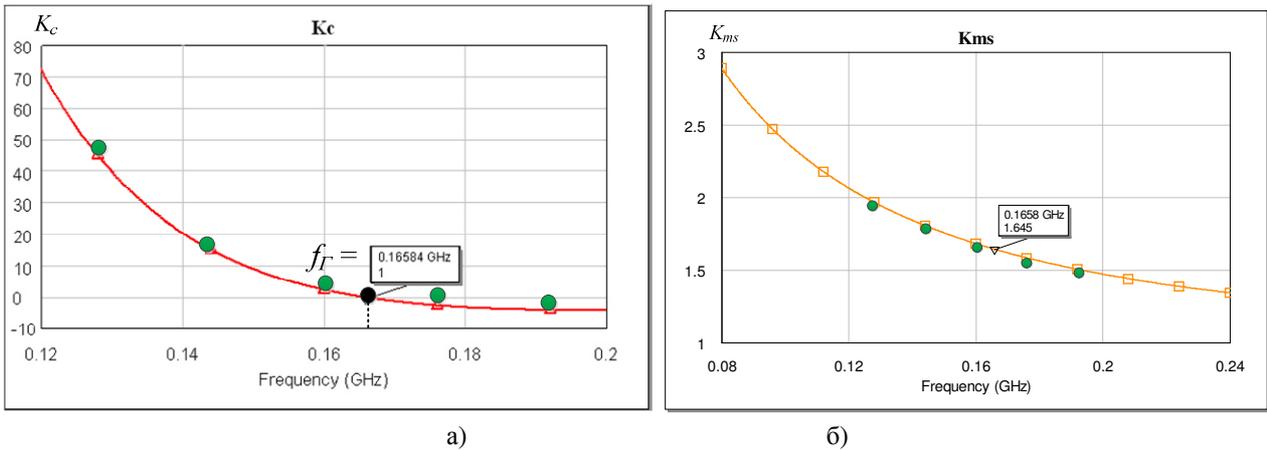


Рис. 5. Зависимость инвариантного коэффициента K_c (а) и максимально достижимого коэффициента передачи мощности на границе устойчивости K_{ms} (б) в диапазоне частот: «—•—» - имитационное моделирование; «•••» - расчёт

На этом же графике видно, что предельная частота двухкаскадного многопараметрического ОПИ_N f_T ($K_c = 1$) по результатам моделирования составляет 165,8 МГц, в то время как расчетное значение $f_T = 175$ МГц. Погрешность для данного параметра составляет 1,93%.

На рис. 5б показаны результаты расчета и моделирования максимально достижимого коэффициента передачи мощности на границе устойчивости K_{ms} . Расчетные значения данного параметра получены с использованием формулы $K_{ms} = |Y_{21} / Y_{12}|$. Расхождение между значениями моделирования и расчета не превышает 1,7%.

Невзаимные свойства ОПИ_N можно количественно оценить с помощью коэффициента невзаимности K_H . Для потенциально неустойчивых ОПИ_N он характеризует невзаимные свойства ОПИ_N в области потенциальной неустойчивости: $K_H (K_c < 1) = \text{Re} W_{22} / \text{Re} W_{11}$.

Результаты моделирования и расчета коэффициента невзаимности отличаются друг от друга на величину 0,22% (рис. 6).

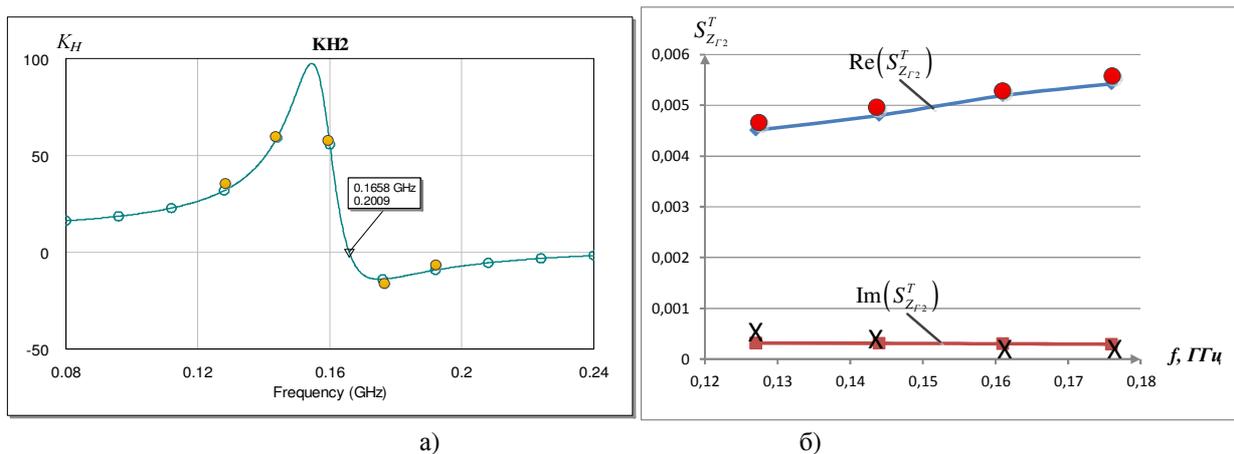


Рис. 6. Зависимость коэффициента невзаимности K_H (а) и чувствительности коэффициента преобразования $S_{\alpha_i}^T$ к изменению параметра $Z_{r2} = j\omega L_1$ (б) в диапазоне частот: «—•—» - имитационное моделирование; «•••» - расчет

Чувствительность коэффициента преобразования $S_{\alpha_i}^{T_k}$ к изменению параметров ОПИ_N является показателем качества N-полюсника. Чем меньше значение чувствительности ОПИ_N, тем качественнее он. Для экспериментального подтверждения корректности разработанной математической модели ОПИ_N исследования чувствительности коэффициента преобразования $S_{\alpha_i}^{T_k}$ проводили относительно изменения параметра $Z_{\Gamma_2} = j\omega L_1$. Результаты моделирования и расчета приведены на рис. 6 б.

Чувствительность коэффициента конверсии рассматриваемого ОПИ_N не превышает 0,006. Погрешность между расчетом данного параметра и значениями имитационного моделирования составляет 1,8%. Это означает, что трехпараметрический двухкаскадный ОПИ_N является качественным, поскольку имеет низкий уровень чувствительности коэффициента преобразования по отношению к воздействию внешних дестабилизирующих факторов.

В соответствии с теорией конформных отображений [10] на комплексной плоскости преобразованная проводимость многопараметрического двухкаскадного ОПИ_N может быть представлена в виде окружности с радиусом ρ

$$\rho_{\text{вых}} = |W_{12} \cdot W_{21}| / 2 \cdot \text{Re}(W_{11} + W_{\Gamma}), \quad (17)$$

и координатой центра W_0 с активной составляющей

$$\text{Re}W_{\text{вых},0} = \text{Re}W_{22} - \text{Re}(W_{12} \cdot W_{21}) / 2 \text{Re}(W_{11} + W_{\Gamma}). \quad (18)$$

Результаты расчета и моделирования параметров иммитансной окружности приведены на рис. 7. Наибольший радиус иммитансной окружности ρ наблюдают на частоте 158,8 МГц (рис. 7 а), а активная составляющая координаты центра $\text{Re}Y_{\text{вых},0}$ на данной частоте равна 0,011 (рис. 7 б).

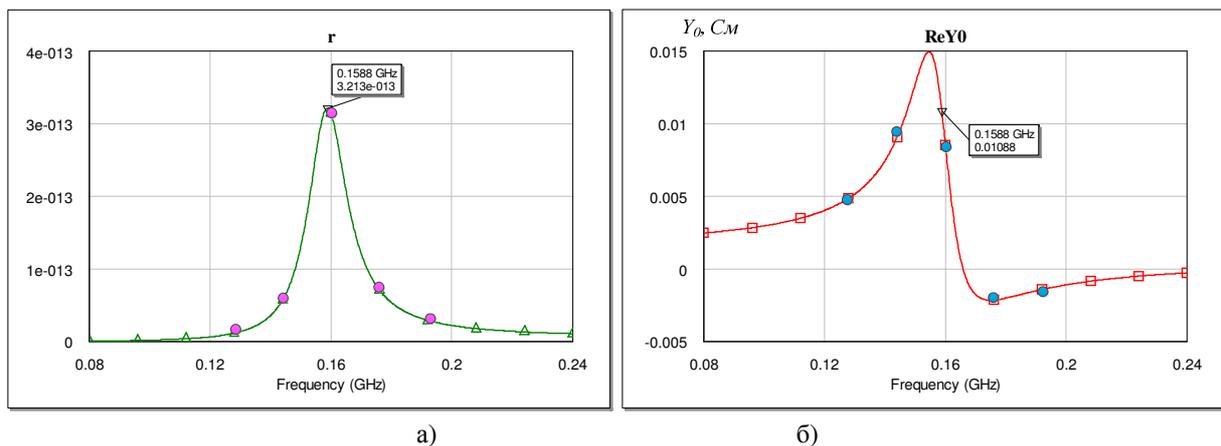


Рис. 7. Зависимости изменения радиуса ρ (а) и активной составляющей координаты $\text{Re}Y_{\text{вых},0}$ (б) выходной иммитансной окружности многопараметрического двухкаскадного ОПИ_N: «—» - имитационного моделирования; «•••» - расчёт

Чем больше радиус иммитансной окружности ρ , тем шире являются функциональные возможности ОПИ_N при реализации на его основе различных видов информационных устройств управления. Погрешность между результатами моделирования и расчета радиуса иммитансной окружности ρ не превышает 5%. Одновременно расхождение между

расчетными значениями и результатами моделирования реальной составляющей координаты центра выходной иммитансной окружности трехпараметрического двухкаскадного ОПИ_N составляет 0,2%.

Анализ результатов имитационного моделирования и расчета определенной системы параметров, которая описывает многопараметрические ОПИ_N, подтверждает корректность разработанной математической модели. О чем свидетельствует расхождение, не превышающее значение 5%, что указывает на целесообразность использования такой модели для расчета различных видов информационных устройств, образуемых каскадным соединением трёхполюсников при наличии реальных начальных условий.

Выводы

Разработана математическая модель N-каскадного соединения многопараметрических ОПИ_N. В отличие от математической модели Бабака Л. И. [11], разработанная математическая модель имеет ряд преимуществ, в частности: возможность перехода от матрицы проводимости одного каскада к общей адмиттансной матрице соединения нескольких каскадов за счет использования перехода к параметрам передачи. Данная математическая модель также описывает зависимость преобразованной проводимости многокаскадного ОПИ_N как от количества каскадов N, так и от значений преобразованных сопротивлений ($Z_0 \dots Z_N$), а также и от параметров отдельных каскадов $[y_i]$, что позволяет провести расчеты различных видов информационных устройств, создаваемых каскадным соединением трёхполюсников.

Для подтверждения корректности полученных аналитических выражений проведено исследование ряда определенных параметров, описывающих основные свойства ОПИ_N на примере двухкаскадного трехпараметрического радиочастотного датчика. Сравнительный анализ результатов имитационного моделирования и расчета основных параметров ОПИ_N показал, что величина относительной погрешности между их значениями лежит в пределах нормы и не превышает 5%. Это указывает на корректность разработанной математической модели и целесообразность ее использования для расчета различных видов информационных устройств, создаваемых каскадным соединением трёхполюсников при наличии реальных начальных условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов А. В. Магнитоэлектрический гиратор / А. В. Филиппов, С. В. Белый, Джуни Жай, Г. А. Семенов // Научно-технический журнал «Вестник Новгородского государственного университета». – 2008. – № 46. – С. 54 – 56.
2. Бенинг Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах / Ф. Бенинг. – М. : Сов. радио, 1975. – 288 с.
3. Пашаев А. М. Физико-технологические и схемотехнические основы негatronики / А. М. Пашаев, Ф. Д. Касимов, Н. А. Филинюк, О. Н. Негоденко. – Баку : Элм, 2008. – 433 с.
4. Кравченко А. М. Двухканальный терморегулятор на основе S-негатронов / А. М. Кравченко, А. М. Анохин // Датчики и системы. – 2013. – № 2. – С. 28 – 32.
5. Ліщинська Л. Б. Інформаційні пристрої на основі багатопараметричних узагальнених перетворювачів імтансу: монографія. / Л. Б. Ліщинська. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 219 с.
6. Филановский Н. М. Схемы с преобразователями сопротивления / Н. М. Филановский, А. Ю. Персианов, В. К. Рыбин. – Л. : Энергия, 1973. – 192 с.
7. Ліщинська Л. Б. Математична модель узагальненого перетворювача імтансу на базі трьохполюсника / Л. Б. Ліщинська // Вісник Тернопільського нац. тех. ун. – 2010. – т. 15, № 3. – С. 165 – 171.
8. Мокін Б. І. Математичні методи ідентифікації динамічних систем : навчальний посібник / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 260 с.
9. Сигорский В. П. Основы теории электронных схем / В. П. Сигорский, А. И. Петренко. – К. : Вища школа, 1971. – 568 с.
10. Лищинская Л. Б. Трёхпараметрический генераторный датчик / Л. Б. Лищинская, Н. А. Филинюк, Я. С. Ткачук, О. О. Лазарев // Научно-технический журнал "Технология и конструирование в электронной Наукові праці ВНТУ, 2015, № 2

аппаратуре". – 2014. – Вип. 4. – С. 21 – 27.

11. Бабак Л. И. Определение матрицы рассеяния соединения СВЧ многополюсников / Л. И. Бабак // Радиотехника. – 1979. – Т. 34, № 11. – С. 78 – 81.

Ткачук Яна Сергеевна – аспирант, кафедра проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры (ПКТА), тел. (063)-889-40-06, rozhkova.yana@gmail.com.

Фурса Светлана Евгеньевна – к. т. н., доцент, кафедра проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры (ПКТА), тел. (063)-880-41-32, rip_1@mail.ru.

Винницкий национальный технический университет.