

**ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА
ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ
ПЛАНАРНЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ**

В.И. Варварин, магистрант ПИИШ;

И.И. Николаев, аспирант каф. ТУ

*Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, viacheslav.i.varvarin@tusur.ru*

Выполнен обзор аналитических моделей для расчета параметров эквивалентных схем замещения планарных катушек индуктивности.

Ключевые слова: планарная катушка индуктивности, эквивалентная схема замещения, аналитические модели.

Проектирование планарных катушек индуктивности интегрального исполнения является затруднительной задачей из-за необходимости учета потерь в диэлектрике, эффектов близости и скин-эффекта в проводнике [1]. Для их моделирования широко применяют системы автоматизированного проектирования (САПР), такие как Sonnet, MagNet, ASITIC и SISP. В данных программных продуктах для вычисления электрических параметров используются численные методы. Так, например, в [2] предлагается использование метода конечных элементов, или комплексный метод, объединяющий метод конформных отображений, и метод конечных разностей во временной области [3]. Стоит отметить, что при схемотехническом моделировании и оптимизации интегральной схемы требуется одновременное изменение большого числа параметров модели, а применение численных методов приводит к высоким вычислительным затратам.

Другим известным методом моделирования планарных катушек индуктивности является метод эквивалентных схем из частичных элементов (ЭСЧЭ) [4]. Метод сводится к представлению ЭСЧЭ катушки индуктивности, которую возможно использовать в SPICE-симуляторах для вычисления её частотных характеристик [5]. Параметры ЭСЧЭ вычисляются при помощи аналитических выражений, что существенно снижает вычислительные затраты. Цель работы – выполнить обзор аналитических моделей для расчета параметров ЭСЧЭ планарных катушек индуктивности.

Методом ЭСЧЭ возможно представление планарных катушек индуктивности интегрального исполнения в свернутом [4] и развернутом [6] видах (рис. 1).

Типовая свернутая катушка методом ЭСЧЭ включает в себя внутреннее сопротивление (R_s) и собственную индуктивность (L_s)

проводника, ёмкости межвитковую (C_s) и подложки (C_p). Развернутая катушка методом ЭСЧЭ содержит паразитную ёмкость (C_{ol}), возникающую между подложкой и проводником катушки, а также сопротивление (R_p) потерь в подложке.

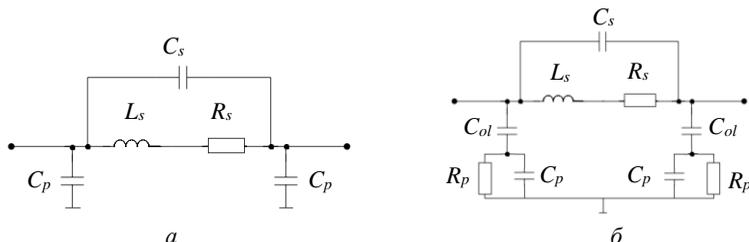


Рис. 1. Планарная катушка индуктивности в свернутом (а) и развернутом (б) видах методом ЭСЧЭ

Сопротивление R_s вычисляется с учетом скин-эффекта, вследствие чего является частотно-зависимым, C_s – суммарная взаимная ёмкость между каждым витком, паразитные ёмкости C_p , C_{ol} вычисляются как ёмкости плоского конденсатора с учетом относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_{ol}) и погонной ёмкости (C_{sub}) кремневой подложки, R_p – вычисляется как собственное сопротивление проводника с учетом погонной проводимости кремневой подложки (G_{sub}). Основной характеристикой катушки является ее индуктивность (L_s), которая может быть вычислена при помощи аналитических выражений, основанных на частных решениях уравнений Максвелла [6–11]. При этом данные выражения имеют значительные погрешности вычислений, составляющие 15–20%, а в некоторых случаях превышающие 80% [11].

Для уменьшения погрешности вычислений L_s в [12] используется модифицированная аналитическая модель из [13] с использованием переменных коэффициентов, получаемых на основе измерений. В [14] используется аналитическая модель, представляющая мономиальное выражение с переменными коэффициентами. Также существует аналитическая модель, основанная на аппроксимации плотности тока с использованием выражения из [12].

Вычисление и сравнение вышеописанных аналитических моделей с результатами моделирования в САПР ASITIC выполнено в [15]. Показано, что погрешность вычислений по аналитическим моделям составляет не более 10%, а наиболее предпочтительная для использования модель представлена в [12].

Для более точного вычисления L_s в [16], предлагается использование геометрической модели, которая разбивается на сегменты с со-

направленным и противоположно направленными токами. Для расчёта L_s выполняется суммирование значений собственных индуктивностей каждого сегмента и значений положительных и отрицательных взаимных индуктивностей. В [17] выполнена программная реализация такой геометрической модели планарной катушки индуктивности с применением VHDL-AMS и использована для расчета катушки в составе силового преобразователя интегрального исполнения. Измерение показало, что погрешность аналитической модели не превышает 3%.

Другая геометрическая модель планарной катушки индуктивности предлагается в [18], которая выполнена в симметричном виде и интегральном исполнении. Геометрическая модель разбивалась на полные и неполные витки, а также на проводники отводов. Аналитическая модель представляет собой сумму всех собственных и взаимных индуктивностей сегментов. Сравнение результатов расчета данной аналитической моделью с результатами моделирования методом конечных элементов показало, что погрешность её вычисления не превысила 2% для диапазона значений индуктивности 0,1...10 нГн.

Таким образом, выполнен обзор аналитических моделей для расчета параметров планарных катушек индуктивности методом ЭСЧЭ, приведены их погрешности вычислений, из которых можно выделить аналитическую модель из работы [18] как модель с наименьшей погрешностью, не превышающей 2%.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-10162, <https://rscf.ru/project/19-79-10162/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pardue C.A. et al. Design and characterization of inductors for self-powered IoT edge devices // IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology. – 2018. – Vol. 8 (7). – P. 1263–1271.
2. Dey A. et al. Design, Fabrication, Analysis and Testing of a Planar Inductor on a High Frequency Buck Converter using SiC Device // IEEE. International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES). – 2022. – Vol. 1. – P. 1–6.
3. Zheng H.X. Numerical modeling for planar spiral inductors in silicon-based radio-frequency integrated circuits // IEEE. Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. – 2005. – Vol. 1. – P. 1–4.
4. Ruehli A.E. Inductance calculations in a complex integrated circuit environment // IBM journal of research and development. – 1972. – Vol. 16. – P. 470–481.
5. Gadjeva E. Development of wide-band geometry dependent RF planar spiral inductor SPICE model / E. Gadjeva, M. Hristov, V. Durev // Proceedings of the 18th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems-MIXDES. – 2011. – P. 446–449.
6. Koutsoyannopoulos Y.K. Systematic analysis and modeling of integrated inductors and transformers in RF IC design / Y.K. Koutsoyannopoulos, Y. Pa-

pananos // IEEE. Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing. – 2000. – Vol. 47, No. 8. – P. 699–713.

7. Voorman J.O. Continuous-time analog integrated filters // Integrated Continuous-Time Filters-Principles, Design, and Applications. – 1993. – P. 15–46.

8. Dill H.G. Designing inductors for thin film applications // Electronic Design. – 1964. – P. 52–59.

9. Bryan H.E. Printed inductors and capacitors // Tele-Tech & Electronic Industries. – 1955. – Vol. 14, No. 12. – P. 68.

10. Ronkainen H. et al. IC compatible planar inductors on silicon // IEEE. Proceedings-Circuits, Devices and Systems. – 1997. – Vol. 144. – P. 29–35.

11. Crols J. et al. An analytical model of planar inductors on lowly doped silicon substrates for high frequency analog design up to 3 GHz // IEEE. 1996 Symposium on VLSI Circuits. Digest of Technical Papers. – 1996. – P. 28–29.

12. Mohan S.S. The Design, Modeling and Optimization of On-Chip Inductor and Transformer Circuits: PhD thesis. Stanford, 1999. – 215 p.

13. Wheeler H.A. Simple inductance formulas for radio coils // Proceedings of the institute of Radio Engineers. – 1928. – Vol. 16, No. 10. – P. 1398–1400.

14. Walker C.S. Capacitance, inductance, and crosstalk analysis. – M.: Artech House, 1999. – 226 p.

15. Mohan S.S. Simple accurate expressions for planar spiral inductances // IEEE Journal of solid-state circuits. – 1999. – Vol. 34, No. 10. – P. 1419–1424.

16. Jenei S. Physics-based closed-form inductance expression for compact modeling of integrated spiral inductors / S. Jenei, B.K.J.C. Nauwelaers, S. Decoutere // IEEE. Journal of solid-state circuits. – 2002. – Vol. 37, No. 1. – P. 77–80.

17. Development of a physically-based planar inductors VHDL-AMS model for integrated power converter design / A. Ammouri et al. // The European physical journal-applied physics. – 2014. – Vol. 66, No. 2. – P. 20901.

18. Erokhin V.V. New Inductance Calculating Formulas of Planar Symmetrical Square Inductors / V.V. Erokhin, S.A. Zavyalov // XVII International scientific and technical conference «Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines» (Dynamics), Russia, Omsk. – 2023. – P. 5.

УДК 621.315

АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ЭКРАНИРУЮЩИХ КОРПУСОВ НА ОСНОВЕ МОНОСТАТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ

А.О. Зайков, магистрант

*Научный руководитель А.А. Иванов, к.т.н., с.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС»
г. Томск, ТУСУР, anton.ivn@tu.tusur.ru*

Выполнено моделирование частотных зависимостей эффективности экранирования и моностатической эффективной площади рассеяния для двух типовых корпусов радиоэлектронных средств. Показано, что на резонансных частотах корпуса обратно рассеянное поле зна-