

УДК 621.318.4

Шифр специальности ВАК: 2.2.14

С.В. Власов, Е.С. Жечев

Методы улучшения добротности и снижения частотной дисперсии параметров интегральных катушек индуктивности: обзор и постановка исследовательских задач

Актуальность. Работа представляет собой обзор современных методов повышения добротности и снижения частотной дисперсии параметров интегральных катушек индуктивности; паразитные ёмкостные связи и омические потери ограничивают добротность и рабочую полосу частот интегральных индуктивностей, применяемых в согласующих цепях, фильтрах и резонаторах СВЧ-диапазона. **Цель исследования.** Систематизация современных подходов к проектированию планарных и объёмных интегральных индуктивностей, направленных на повышение добротности и снижение частотной дисперсии параметров, а также формулирование исследовательских гипотез в области конструктивно-топологической оптимизации. **Методы.** Аналитический обзор конструктивных решений, включая нерегулярную ширину проводников, фрактальные геометрии, многослойные структуры, методы экранирования подложки и способ соединения. **Научная новизна.** Комплексное рассмотрение факторов, определяющих добротность и частотную дисперсию интегральных индуктивностей, в совокупности с конструктивно-топологическими аспектами, ранее рассматриваемыми преимущественно раздельно. **Результаты.** Показано, что оптимизация геометрии витков и применение многоуровневой металлизации позволяют повысить добротность, при этом влияние способов соединения и взаимной ориентации многослойных структур остаётся недостаточно изученным; сформулированы гипотезы о возможности улучшения частотных характеристик за счёт комплексной оптимизации геометрии и топологии интегральных индуктивностей. **Практическая значимость.** Результаты обзора могут быть использованы при проектировании согласующих цепей, фильтров и резонаторов СВЧ-диапазона на этапе выбора геометрии и топологии интегральных катушек индуктивности.

Ключевые слова: интегральная индуктивность, добротность, частотная дисперсия параметров, собственный резонанс, паразитная ёмкость, топология СВЧ-схем, фрактальные структуры.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-7-15

Введение

Первые систематические исследования планарных интегральных катушек индуктивности связаны с работой Нгуена и Мейера [1], где было показано, что спиральные проводники, совместимые с кремниевой технологией, могут заменить дискретные катушки в LC-фильтрах, несмотря на невысокую на тот момент добротность. В последующие десятилетия развитие технологий металлизации и появление структур на основе полужизнирующих подложек (в том числе GaAs) позволило существенно повысить добротность и расширить рабочий диапазон интегральных индуктивностей.

Стремительное развитие систем беспроводной связи, переход к стандартам 5G/6G и освоение миллиметрового диапазона длин волн диктуют жесткие требования к компонентной базе СВЧ-устройств. В условиях роста рабочих частот и необходимости расширения полос пропускания критически важными становятся вопросы обеспечения частотной дисперсии характеристик интегральных элементов [2–4]. В современной радиоэлектронике важной характеристикой индуктивных элементов (в контексте широкополосных приложений) является частотная дисперсия их параметров, а именно эффективной индуктивности $L(\omega)$ и добротности $Q(\omega)$, в пределах рабочей полосы частот; минимизация этой дисперсии обеспечивает стабильную работу устройства в заданном диапазоне. Смещение частоты собственного резонанса вследствие технологических разбросов, пара-

зитных ёмкостей и эффектов близости приводит к рассогласованию импедансов, сужению рабочей полосы и деградации амплитудно-частотных характеристик устройств [5].

Рост сложности современных интегральных технологий, связанный с применением многоуровневой металлизации, уменьшением топологических норм и увеличением плотности интеграции, неизбежно усиливает влияние паразитных электромагнитных эффектов [6, 7]. Это особенно критично для таких узлов, как малошумящие усилители, генераторы, управляемые напряжением, и согласующие цепи, где интегральные катушки индуктивности являются одними из ключевых частотно-задающих компонентов [8, 9].

Существует фундаментальное противоречие: требования к миниатюризации пассивных элементов вступают в конфликт с необходимостью сохранения высоких значений добротности и индуктивности. Попытки уменьшения площади кристалла в рамках стандартных технологий часто приводят к снижению собственной резонансной частоты и росту омических потерь [10, 11]. Работоспособность СВЧ-устройств напрямую определяется тем, насколько эффективно удастся компенсировать эти паразитные эффекты [12].

Интегральные катушки индуктивности характеризуются рядом физических ограничений, влияющих на их частотный отклик [13, 14]. Значение индуктивности определяется геометрией проводников, числом витков и занимаемой площадью. Однако увеличение

числа витков для роста L сопровождается удлинением проводника и повышением плотности намотки. Это, в свою очередь, приводит к росту паразитной межвитковой емкости и емкости на подложку [15], а также к влиянию скин-эффекта и эффекта близости.

В ряде работ [16–18] показано, что ключевые параметры (добротность, индуктивность) жестко взаимосвязаны. Например, в [19] приведен сравнительный анализ различных технологий изготовления, подтверждающий, что максимальное улучшение характеристик возможно только при комплексном подходе. В диссертационных исследованиях [20] отмечается, что паразитная емкость является основным фактором, ограничивающим частотный диапазон, а потери в полупроводниковой подложке и тонких слоях металлизации снижают добротность.

Важным аспектом является влияние технологического процесса и материалов. Так, замена алюминиевой металлизации на медную позволяет повысить добротность в 1,5–3,6 раза [21], что критично, например, для высокочастотных фильтров. Для полупроводниковых структур на основе GaAs дополнительным фактором выступает выбор материала металлизации: ввиду ограниченной совместимости медных процессов с арсенид-галлиевой технологией на практике чаще применяется золотая металлизация, обладающая высокой проводимостью и стойкостью к окислению. Существенное влияние на добротность и паразитную ёмкость также оказывают свойства подложки: полуизолирующий GaAs, в отличие от низкого кремния, снижает потери на вихревые токи и связанные с ними диэлектрические потери в подложке [22].

Для анализа и проектирования таких структур широко используется метод эквивалентных схем. Классическая П-образная модель позволяет учитывать распределенные параметры R , L , C и рассчитывать частотную зависимость эффективной индуктивности через входной импеданс $Z_{вх}$ согласно выражению (1) [23]:

$$L_3(\omega) = \text{Im}(Z_{вх})\omega^{-1} = \text{Im}\left(Z_0 \frac{1+S_{11}}{1-S_{11}}\right)\omega^{-1}. \quad (1)$$

Однако, несмотря на обширную литературу по оптимизации геометрии (формы витков, сечения проводников), вопросы влияния способов соединения (топологии соединения витков, межслойной коммутации) и их взаимной ориентации на частотную дисперсию параметров в интегральном исполнении изучены недостаточно полно. Большинство исследований фокусируется на достижении номинала индуктивности, оставляя вопросы широкополосности и частотной дисперсии параметров на втором плане.

Целью данной статьи является обзор и систематизация существующих конструктивно-топологических методов уменьшения частотной дисперсии параметров и добротности интегральных катушек индуктивности, а также формулирование гипотез и определение перспективных направлений исследований в области конструктивно-топологической опти-

мизации межсоединений. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ влияния геометрии витков (включая фрактальные и нерегулярные структуры) на добротность и частотный диапазон;
- обзор методов снижения паразитных емкостей в многослойных структурах;
- выявление взаимосвязи между способом соединения (коммутации) индуктивных элементов и их частотными характеристиками.

Методы оптимизации геометрии и топологии

Выбор топологии планарной катушки индуктивности является первым этапом проектирования, определяющим компромисс между занимаемой площадью кристалла, индуктивностью и добротностью. В современной микроэлектронике наиболее распространены спиральные структуры: квадратные, шестиугольные, восьмиугольные и круглые.

Сравнительный анализ базовых геометрий, проведенный в работе [24], показывает, что форма витков существенно влияет на омические потери и распределение электромагнитного поля. Как показано на рис. 1, восьмиугольная топология демонстрирует наименьшие потери и более высокую добротность по сравнению с квадратной и шестиугольной конфигурациями, приближаясь по характеристикам к идеальной круглой спирали, но будучи более технологичной при сеточном проектировании.

Дальнейшее развитие геометрической оптимизации связано с переходом к объемным структурам. В исследовании [25] рассмотрен широкий спектр топологий, включая 3D-соленоиды, конические (сужающиеся) спирали и стековые структуры. Установлено, что для малых номиналов индуктивности (порядка 2 нГн) наименьшей частотной дисперсией обладает сужающаяся 3D-П-образная спираль, тогда как для больших номиналов (16 нГн) предпочтительна классическая сужающаяся 3D-спираль. Это объясняется снижением межвитковой паразитной емкости за счет пространственного разнесения витков.

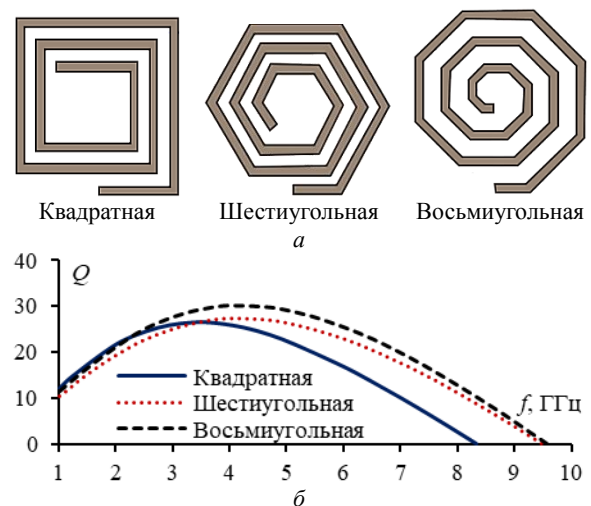


Рис. 1. Три типа планарных катушек индуктивности (а) и их характеристики (б) [24]

Одним из эффективных методов повышения добротности является использование проводников с переменной (нерегулярной) шириной. Физический смысл данного подхода заключается в подавлении эффекта вытеснения тока и скин-эффекта во внутренних витках спирали, где магнитное поле наиболее интенсивно.

В работе [26] предложена восьмиугольная спиральная катушка с монотонно уменьшающейся шириной проводника от внешних витков к внутренним (рис. 2). Экспериментальные данные подтверждают, что такая модификация позволяет увеличить максимальную добротность с 17,5 до 23,8 и повысить индуктивность в низкочастотной области с 6,4 до 8,3 нГн (для шестивитковой конфигурации).

Альтернативный подход к нарушению регулярности формы рассмотрен в [27], где анализируются одновитковые восьмиугольные индуктивности с асимметричными сторонами. Показано, что увеличение длины горизонтальных сегментов при сохранении вертикальных размеров способствует росту добротности на низких частотах (рис. 3). Однако уменьшение вертикального размера, как правило, ведет к деградации параметров, что требует тщательной оптимизации соотношения сторон.

Для интегральных преобразователей напряжения критическим параметром является не только добротность, но и активное сопротивление постоянному току, влияющее на КПД устройства. В [28] продемонстрировано, что модифицированная восьмиугольная форма, оптимизированная под площадь кристалла, позволяет снизить сопротивление с 1,56 до 1,48 Ом по сравнению с квадратным аналогом. Это обеспечивает прирост КПД преобразователя примерно на 5% (рис. 4).

Помимо геометрии проводников, существенный вклад в снижение добротности вносят вихревые токи, индуцируемые в полупроводниковой подложке. Для минимизации этого эффекта в работе [29] предложен метод структурирования подложки с использованием n -карманов в p -подложке (технология объемных КМОП).

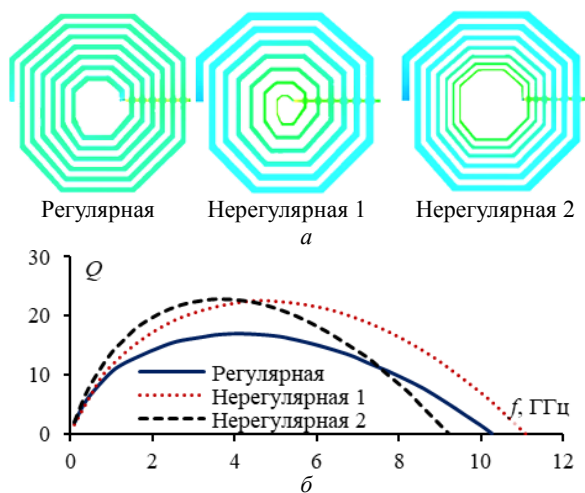


Рис. 2. Восьмиугольная катушка индуктивности с нерегулярной шириной проводников (а) и ее результаты (б) [26]

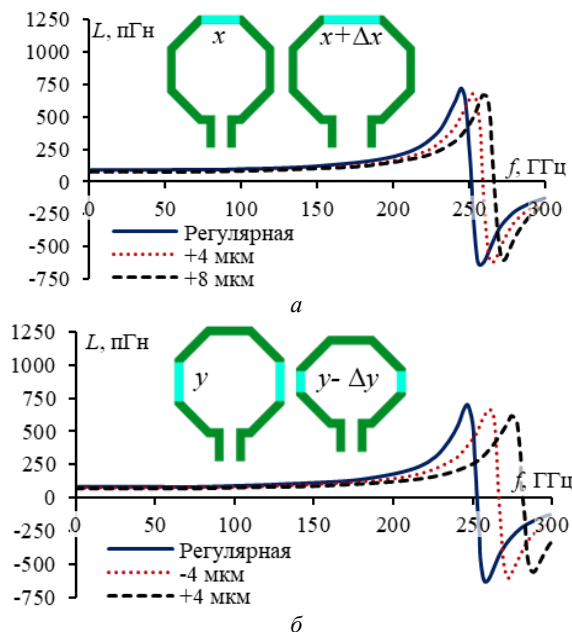


Рис. 3. График индуктивности для нерегулярной катушки индуктивности по горизонтали (а) и по вертикали (б) [27]

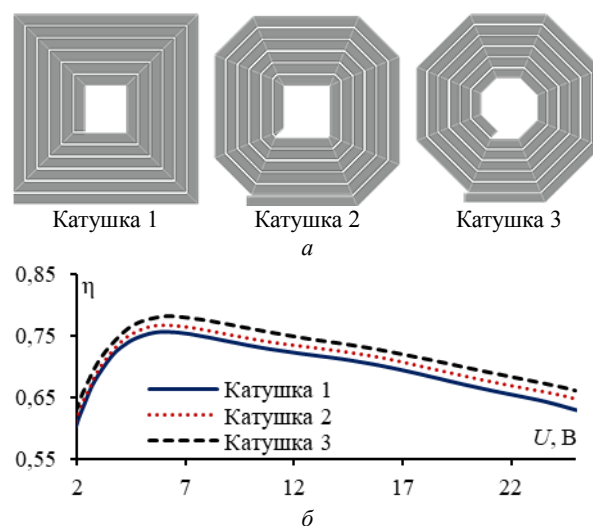


Рис. 4. Исследуемые катушки индуктивности различной формы (а) и их КПД (б) [27]

Сравнительный анализ двух топологий экранирования (рис. 5) показал следующие результаты:

- структура 1 (вертикальные полосы n -ячеек): обеспечивает рост добротности на 77% (с 3 до 5,5) и индуктивности на 8%;

- структура 2 (изолированные островки n -ячеек): дает прирост добротности на 16% и индуктивности на 4%.

Такой подход позволяет эффективно блокировать пути протекания вихревых токов без изменения топологии самой катушки.

Перспективным направлением миниатюризации при сохранении высоких значений индуктивности является использование фрактальных кривых. В работе [30] исследована планарная индуктивность на основе кривых Мура (рис. 6).

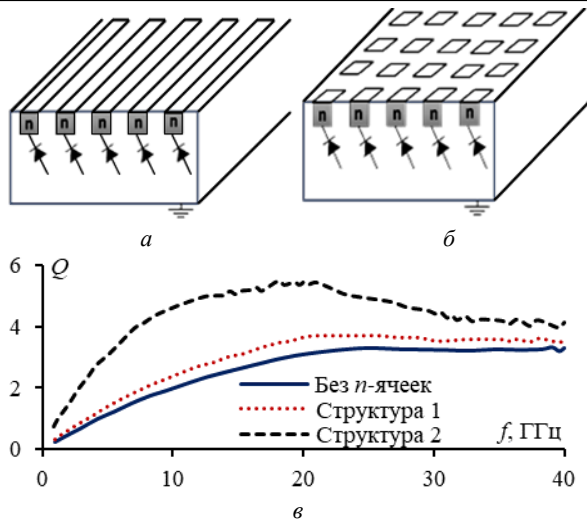


Рис. 5. Вид в разрезе структур 1 (а) и 2 (б) и их добротность (в) [29]

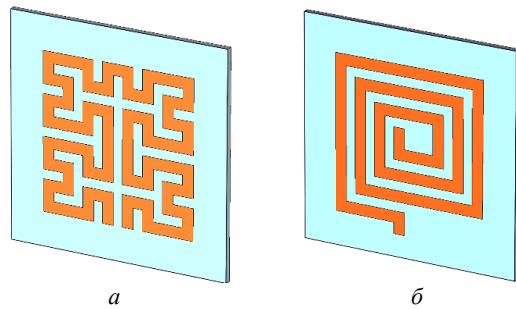


Рис. 6. Планарная катушка индуктивности с фрактальной (а) и спиральной структурой (б) [30]

Фрактальная геометрия позволяет существенно увеличить длину проводника на ограниченной площади, что обеспечивает высокую плотность индуктивности. Сравнение с традиционной спиральной катушкой (рис. 7) демонстрирует гибкость настройки индуктивности за счет изменения порядка фрактала (количества итераций узора).

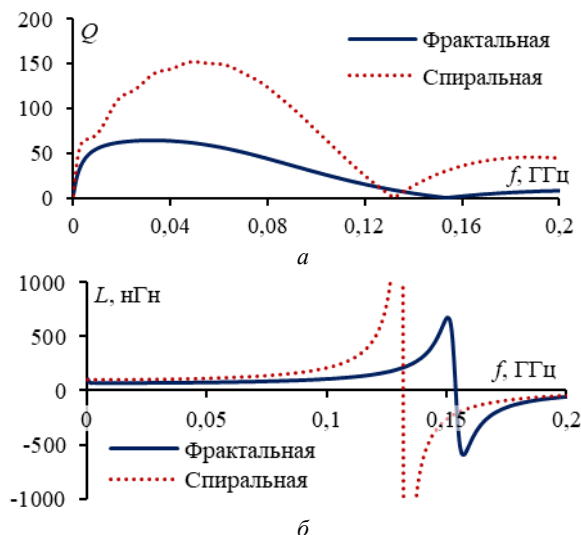


Рис. 7. Графики добротности (а) и индуктивности (б) для катушек индуктивности с фрактальной и спиральной топологиями

Однако следует отметить, что сложная форма проводника может приводить к росту паразитной межвитковой емкости и снижению частоты собственного резонанса, что требует дополнительного анализа при проектировании СВЧ-устройств.

Способы соединения и многослойные топологии

Анализ литературных источников показывает, что подавляющее большинство исследований фокусируется на оптимизации геометрии одиночных катушек. Однако в сложных СВЧ-устройствах (фильтры, согласующие цепи, дифференциальные усилители) индуктивности редко используются изолированно. Взаимное расположение и способ электрического соединения витков оказывают критическое влияние на результирующую индуктивность, добротность и, что не менее важно, на частотную дисперсию параметров [31–33].

Существует множество вариантов соединения индуктивных элементов, которые можно классифицировать по типу электрической связи (последовательное, параллельное) и магнитной связи (согласное, встречное включение). На рис. 8 представлены типовые способы соединения, включая варианты с сильной магнитной связью (трансформаторный тип).

Схемы 2 и 3 отличаются относительной ориентацией витков, однако при отсутствии магнитной связи между элементами ($M = 0$) это не влияет на результирующую индуктивность, которая в обоих случаях равна $L_1 + L_2$. Известно, что при наличии взаимной индукции M общая индуктивность системы L_{total} зависит от знака связи: $L_{total} = L_1 + L_2 \pm 2M$. Однако, как отмечается в [34–36], влияние способа соединения не ограничивается только изменением номинала L . Различные конфигурации по-разному перераспределяют потенциалы вдоль витков, что изменяет эффективную паразитную емкость C_{eff} и, следовательно, частоту собственного резонанса. Несмотря на значимость этого эффекта, системные исследования данного вопроса в контексте интегральных способов соединений катушек индуктивностей представлены фрагментарно [37].

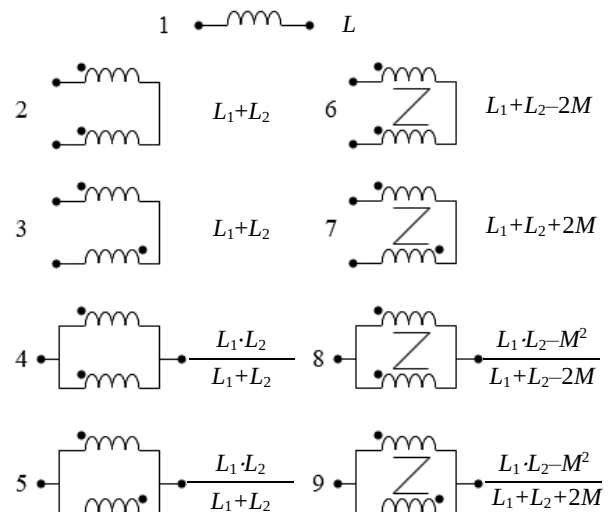


Рис. 8. Способы соединения катушек индуктивности

Управление взаимной индуктивностью открывает возможности для создания перестраиваемых компонентов. В работе [38] предложена топология на основе связанных линий, где коэффициент связи регулируется с помощью ключевых элементов (рис. 9). Такой подход позволяет изменять общую индуктивность без увеличения площади кристалла, реализуя функцию вариометра в планарном исполнении. Экспериментально подтверждено, что управление магнитной связью является эффективным методом коррекции частотной характеристики в широком диапазоне. Перестройка индуктивности реализована за счёт вторичного связанного контура, магнитная связь которого с основной катушкой управляется переключателем. В замкнутом состоянии переключателя (см. рис. 9, а, справа) во вторичном контуре наводится ток, изменяющий эффективную индуктивность первичной катушки за счёт взаимной индукции M ; в разомкнутом состоянии (см. рис. 9, а, слева) цепь вторичного контура разорвана, и его вклад в результирующую индуктивность отсутствует, что соответствует состояниям «Включено» и «Выключено» на рис. 9, б.

В условиях дефицита площади на кристалле или печатной плате часто применяются многослойные катушки. Однако простое вертикальное размещение витков приводит к резкому росту межслойной паразитной емкости. В исследованиях [39, 40] проведен детальный анализ влияния последовательности соединения слоев на паразитную емкость четырехслойной структуры. Как показано на рис. 10 и в таблице, изменение порядка коммутации слоев (например, соединение слоя 1 со слоем 3, а затем 2 и 4) позволяет существенно снизить разность потенциалов между соседними витками.

Результаты показывают, что оптимизированный способ коммутации (чередующаяся намотка) снижает эквивалентную емкость до 77% по сравнению с последовательным соединением смежных слоев.

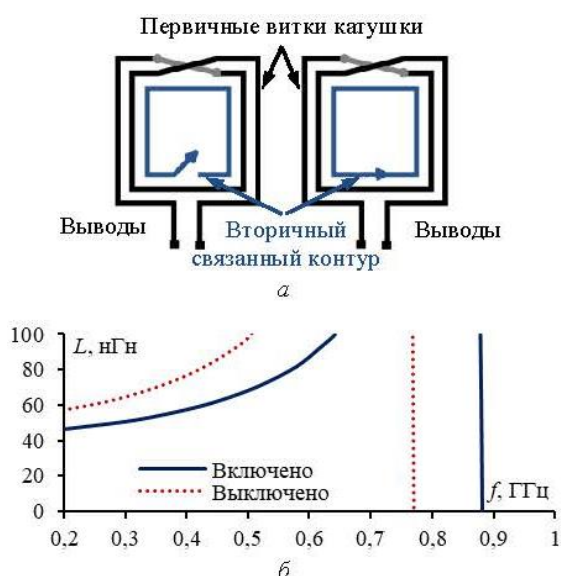


Рис. 9. Способ коммутации перестраиваемой катушки индуктивности (а) и ее индуктивность до и после переключения (б) [38]

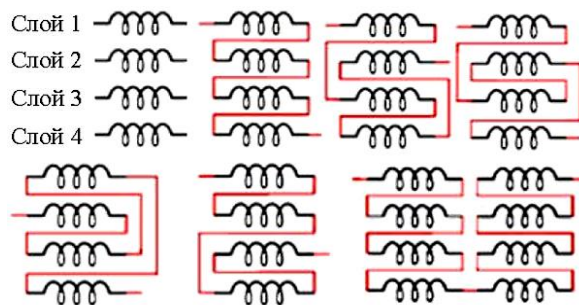


Рис. 10. Различные последовательные соединения слоев печатной платы [39, 40]

Сравнение эквивалентных емкостей для различных расположений витков внутри слоев

Намотка	Эквивалентная емкость
Типы соединений	Относительная емкость, % (1, 2, 3, 4)
(1,2,3,4)	100
(1,3,4,2)	142
(1,3,2,4)	135
(2,3,1,4)	138
(1,2,4,3)	110
Раздельные витки	77

Этот принцип, продемонстрированный на печатных платах, имеет прямой потенциал для применения в многоуровневых металлизациях интегральных катушек индуктивностей.

В работе [41] исследуется влияние геометрии подключения выводов на характеристики двухслойной спиральной катушки. Продemonстрировано, что оптимизация точек соединения витков (например, использование промежуточных отводов или перекрестное соединение слоев) позволяет модифицировать распределение электрического поля.

На рис. 11 видно, что различные способы соединения (внешнее, промежуточное, чередующееся подключение) при неизменной геометрии самой спирали приводят к заметному сдвигу резонансной частоты.

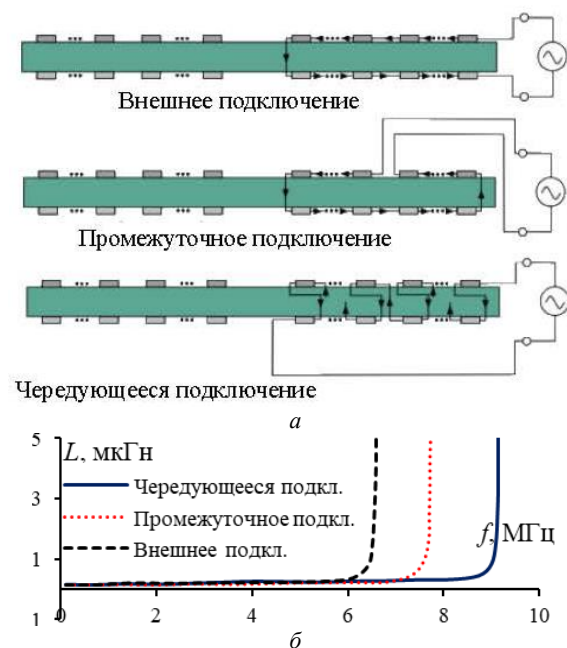


Рис. 11. Поперечное сечение и способы соединения катушки индуктивности

Это подтверждает тезис о том, что топология соединений является самостоятельным инструментом настройки частотной дисперсии параметров.

Постановка исследовательских задач

В качестве целевой технологии для дальнейших исследований рассматриваются катушки индуктивности на полупроводниковых подложках группы АЗВ5, в частности, на основе арсенида галлия. Данная технология остаётся наиболее востребованной при реализации СВЧ-монокристаллических интегральных схем благодаря высокой подвижности носителей заряда и полуизолирующим свойствам подложки, обеспечивающим низкие диэлектрические потери на высоких частотах, что делает целесообразным сосредоточить дальнейшие исследования именно на данном классе структур.

Проведенный обзор выявил существенный пробел в современной научно-технической литературе: отсутствие комплексного анализа влияния способов соединения на частотную дисперсию параметров интегральных индуктивностей. Большинство существующих решений рассматривают либо геометрию изолированной катушки, либо схемотехнику на уровне печатных плат.

На основании выявленных закономерностей и пробелов формулируются следующие научные гипотезы, определяющие направления дальнейших исследований:

- предполагается, что использование фрактальной геометрии (например, кривых Мура) в конструкции связанных катушек позволит повысить степень управляемости индуктивностью и расширить диапазон перестройки за счет более развитой поверхности взаимодействия полей;
- можно предположить, что применение проводников с оптимизированной нерегулярной шириной в трансформаторных включениях позволит найти оптимальный аналитический закон профилирования ширины для трансформаторных включений;
- комбинация подходов (разнесение слоев и профилирование ширины) должна привести к одновременному снижению паразитной емкости и омических потерь, что обеспечит максимальное расширение рабочей полосы частот;
- предполагается, что угловая ориентация является дополнительной степенью свободы, позволяющей точно настраивать коэффициент связи и минимизировать паразитные электромагнитные связи;
- предполагается, что существует оптимальная конфигурация коммутации, обеспечивающая минимальную частотную дисперсию параметров индуктивности за счет взаимной компенсации паразитных реактивностей.

Заключение

В работе проведен систематический обзор методов улучшения характеристик интегральных индуктивностей. Показано, что традиционные методы геометрической оптимизации (восьмиугольные спирали, экранирование подложки) приближаются к теоретическому пределу эффективности. В то же время

конструктивно-топологические методы (оптимизация межслойных соединений, использование связанных структур с управляемой геометрией) обладают значительным нераскрытым потенциалом. Подтверждение сформулированных гипотез потребует проведения серии вычислительных и лабораторных экспериментов, результаты которых могут лечь в основу новых методик проектирования СВЧ-компонентов и устройств.

Литература

1. Nguyen N.M. Si IC-Compatible Inductors and LC Passive Filters / N.M. Nguyen, R.G. Meyer // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1990. – Vol. 25, No. 4. – P. 1028–1031.
2. Оценка влияния отклонения конструктивных параметров интегральных LC-фильтров на их частотные характеристики / Ю.И. Егошин, А.А. Тюменцева, Т.С. Тимошенко, А.Н. Яковлев // Техника радиосвязи. – 2025. – № 1 (64). – С. 64–71.
3. Дубровин В.С. Оценка стабильности частотных характеристик управляемого фазовращателя // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. – Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 4. – С. 92–100.
4. Алимов А.П. Моделирование и проектирование избирательных усилителей второго порядка / А.П. Алимов, Б.Ф. Змий // Информатика: проблемы, методология, технологии: матер. XVI Междунар. науч.-метод. конф., Воронеж, 11–12 февраля 2016 г. / под ред. Н.А. Тюкачева. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2016. – С. 16–21.
5. Устройства приема и обработки сигналов в упражнениях и задачах: учеб. пособие / В.А. Аржанов, А.П. Найменко, А.И. Одинец, Т.В. Багаева. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2018. – 225 с.
6. A design methodology for RF/mmWave LNAs in 22 nm FD-SOI with cross-coupling-aware nested inductors and on-chip baluns / S. Drakakis, A. Michailidis, D. Tzagkas // Electronics. – 2026. – Vol. 15, No. 1. – Art. 25.
7. Пат. 4 867 703 США B2. Thin film structures with negative inductance and methods for fabricating inductors comprising the same / A. Widjaja, A. Sarangan (США). № 12/427,296; заявл. 21.04.2009; опубл. 07.06.2011. – 7 с.
8. Chen L. High inductance density in CMOS-compatible magnetically integrated 3D microinductors for radio-frequency applications / L. Chen, Z. Qiao, S. Liu, T. Noulis // Nature Communications. – 2025. – Vol. 16, No. 1. – P. 10072.
9. Ezhilarasu G. Integrated micro-capacitors and micro-inductors for next generation electronics / G. Ezhilarasu, S.S. Iyer // IEEE Nanotechnology Magazine. – 2024. – Vol. 18, No. 2. – P. 30–40.
10. Mi X. High-frequency applications / X. Mi, S. Ueda // Advanced Microwave Circuits and Systems / ed. V. Zhurbenko. – Hamburg: BoD – Books on Demand, 2010. – P. 249–268.
11. Shin K.R. Compact 5G n77 band pass filter with through silicon via (TSV) IPD technology / K.R. Shin, J. Arendell, K. Eilert // 2019 IEEE 20th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Cocoa Beach, FL, USA, April 2019. – New York: IEEE, 2019. – P. 1–3.
12. Shaltout A.H. Layout optimization of planar inductors for high-efficiency integrated power converters / A.H. Shaltout, S. Gregori // Analog Integrated Circuits and Signal Processing. – 2020. – Vol. 102, No. 1. – P. 155–167.
13. Птицын Д.В. О влиянии параметров регулируемой катушки индуктивности на значение мощности, измеряемой в RLC-цепях / Д.В. Птицын, Е.В. Птицына, А.Б. Кувалдин // Энерго- и ресурсосбережение XXI век: сборник

матер. XII Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Орёл, март–июнь 2014 г. – Орёл, 2014. – С. 61–64.

14. Computational analysis on self-resonance frequency of solenoid and planar inductor / M.S. Choi, S.J. Kim, Y.S. Lee, C.H. Cho, I.H. Seong, W.N. Jeong, S.J. You // *Applied Science and Convergence Technology*. – 2023. – Vol. 32, No. 2. – P. 54–57.

15. Агарков Н.Е. Влияние паразитной ёмкости согласующей цепи на вносимые потери антенного согласующего устройства // *Техника радиосвязи*. – 2025. – № 1 (64). – С. 40–55.

16. An overview of fully on-chip inductors / R. Ondica, M. Kovac, A. Hudec, R. Ravasz, D. Maljar, V. Stopjakova, D. Arbet // *Radioengineering*. – 2023. – Vol. 32, No. 1. – P. 11–22.

17. Spataro S. A Geometrically Scalable Lumped Model for Spiral Inductors in Radio Frequency GaN Technology on Silicon / S. Spataro, G. Sapone, M. Giuffrida, E. Ragonese // *Electronics*. – 2024. – Vol. 13, No. 13. – P. 2665.

18. Chen H.H. Analytic Design of On-Chip Spiral Inductor with Variable Line Width / H.H. Chen, Y.W. Hsu // *Electronics*. – 2022. – Vol. 11, No. 13. – P. 2029.

19. A review of engineering techniques for CMOS on-chip inductor design and quality factor enhancement from MHz-to-GHz frequency domains / S. Mariappan, J. Rajendran, N. Idros, A. A. Manaf, N. Kumar, A. Alghaihab, B.S. Yarman // *IEEE Access*. – 2025. – Vol. 13. – P. 140473–140499.

20. Боре́йко Д.А. Усовершенствованный подход к моделированию интегральных компонентов для LC-фильтров: спец-ть 05.13.10: дис. ... канд. техн. наук. – Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2017. – 187 с.

21. Ерохин В.В. Влияние характеристик технологического процесса на проектирование СВЧ LC-фильтров в СНК / В.В. Ерохин, С.А. Завьялов // *Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем: матер. IX Всерос. науч.-техн. конф.*, Омск, 26–27 апреля 2022 г. – Омск: Омский гос. техн. ун-т, 2022. – С. 108–117.

22. Wu N. Microstructure Characterization and Interfacial Reactions between Au-Sn Solder and Different Back Metallization Systems of GaAs MMICs / N. Wu, Y. Hu, S. Sun // *Materials*. – 2020. – Vol. 13, No. 6. – Art. 1266.

23. Добуш И.М. Построение моделей пассивных элементов и автоматизированное проектирование СВЧ-монокристаллических усилителей с учетом влияния температуры: спец-ть 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, ТУСУР, 2012. – 199 с.

24. Effect of differently shaped spiral inductors on micro power integrated circuit / A. Namoune, R. Taleb, M.R. Benzidane, R. Melati, N. Mansour, Z. Benbouzid, H. Saidi // *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*. – 2024. – Vol. 24, No. 2. – P. 38–46.

25. Боре́йко Д.А. Исследование параметров катушек индуктивности, выполненных по LTCC-технологии / Д.А. Боре́йко, Т.С. Дьяченко, А.И. Тюменцев // *Техника радиосвязи*. – 2012. – № 17. – С. 73–83.

26. Tayenjam S. High-Q variable pitch spiral inductors for increased inductance density and figure-of-merit / S. Tayenjam, V. Vanukuru, K. Sundaram // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2019. – Vol. 66, No. 4. – P. 4481–4485.

27. Chavva S. Experimental analysis of irregularly shaped octagonal on-chip inductors for improving area-efficiency in CMOS RFICs for millimeter wave applications / S. Chavva, I. Raja // *Integration*. – 2025. – Vol. 100. – P. 102259.

28. Shaltout A.H. Layout optimization of planar inductors for high-efficiency integrated power converters / A.H. Shaltout, S. Gregori // *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. – 2020. – Vol. 102, No. 1. – P. 155–167.

29. Chavva S. N-well patterning of P-type CMOS substrate for improving quality factor of on-chip inductors at mil-

limeter wave frequencies / S. Chavva, I. Raja // 2025 38th International Conference on VLSI Design and 2024 23rd International Conference on Embedded Systems (VLSID), January 2025. – New York: IEEE, 2025. – P. 186–190.

30. Bjelica J.M. Modeling and performance analysis of planar fractal inductors / J.M. Bjelica, N.M. Djuric, S.M. Djuric // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2020. – Vol. 56, No. 11. – P. 1–8.

31. Alpaslan H. A new active device namely S-CCI and its applications: simulated floating inductor and quadrature oscillators / H. Alpaslan, E. Yuce, S. Minaei // *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. – 2022. – Vol. 69, No. 9. – P. 3554–3564.

32. High-performance compact 3-D solenoids for RF applications / A. Cayron, C. Viallon, O. Bushueva, A. Ghannam, T. Parra // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2018. – Vol. 28, No. 6. – P. 479–481.

33. Advances and perspectives in magnetic-integrated inductors for RF ICs / W. Hao, X. Li, Z. Pan, R. Miao, Z. Yue, C. Yang, A.Z. Wang // *IEEE Transactions on Materials for Electron Devices*. – 2024. – Vol. 1. – P. 106–120.

34. An overview of fully integrated switching power converters based on switched-capacitor versus inductive approach and their advanced control aspects / G. Kiran Kumar, T. Kobaku, S. Sahoo, B. Subudhi, D. Elangovan, F. Blaabjerg // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 11. – P. 3250.

35. Wouters H. Integrated inductor-transformers for high-frequency converters: an overview / H. Wouters, W. Martinez // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2025. – Vol. 40, No. 9. – P. 13157–13176.

36. Stability improvement of isolated multiple-output DC/DC converter using coupled inductors / E. Sanchis-Kilders, A. Ferreres, J.L. Gasent-Blesa, E. Maset, V. Esteve, J. Jordan, J.B. Ejea // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2016. – Vol. 52, No. 4. – P. 1644–1653.

37. Fabrication of QFN-packaged miniaturized GaAs-based bandpass filter with intertwined inductors and dendritic capacitor / J. Chen, Z.J. Wang, B.H. Zhu, E.S. Kim, N.Y. Kim // *Materials*. – 2020. – Vol. 13, No. 8. – P. 1932.

38. Experimental evaluation of coupled-line tunable inductors with switchable mutual coupling / Y. Kim, J. Lee, S. Kim, C. Park // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, No. 16. – P. 3228.

39. Kolahian P. A comprehensive review on planar magnetics and the structures to reduce the parasitic elements and improve efficiency / P. Kolahian, F. Grimm, M. Baghdadi // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 7. – P. 3254.

40. Shahabi Ghahfarokhi N. Minimising capacitive couplings and distributing copper losses in planar magnetic elements: Masters by Research thesis. – Brisbane: Queensland University of Technology, 2010.

41. Lope I. First self-resonant frequency of power inductors based on approximated corrected stray capacitances / I. Lope, C. Carretero, J. Acero // *IET Power Electronics*. – 2021. – Vol. 14. – P. 257–267.

Власов Сергей Владиславович

Аспирант, ассистент каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР)
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0002-3848-1079
Тел.: +7 (382-2) 41-36-43
Эл. почта: sergei.v.vlasov@tusur.ru

Жечев Евгений Сергеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. СВЧКР ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0003-4469-7033

Тел.: +7 (382-2) 41-36-43

Эл. почта: zhechev75@gmail.com

Поступила в редакцию: 01.04.2026.

Принята к публикации: 27.08.2026.

Vlasov S.V., Zhechev Y.S.

Methods for improving the quality factor and reducing the frequency dispersion of integrated inductor parameters: a review and formulation of research problems

Relevance. This paper presents a review of current methods for improving the quality factor and reducing the frequency dispersion of integrated inductor parameters. Parasitic capacitive coupling and ohmic losses limit the quality factor and operating bandwidth of integrated inductors used in matching circuits, filters, and resonators of the microwave range. **Objective.** The study aims to systematize current approaches to the design of planar and three-dimensional integrated inductors aimed at increasing the quality factor and reducing the frequency dispersion of parameters, as well as formulating research hypotheses in the field of design-topological optimization. **Methods.** An analytical review of design solutions, including irregular conductor width, fractal geometries, multilayer structures, substrate shielding techniques, and connection method. **Scientific novelty.** A comprehensive consideration of the factors determining the quality factor and frequency dispersion of integrated inductors is presented, together with design-topological aspects that have previously been investigated mostly separately. **Results.** It is shown that optimizing the winding geometry and applying multilevel metallization improve the quality factor, while the influence of connection methods and the mutual orientation of multilayer structures remains insufficiently studied. Research hypotheses are formulated concerning the potential improvement of frequency characteristics through the comprehensive optimization of the geometry and topology of integrated inductors. **Practical significance.** The review results can be used in the design of microwave-band matching circuits, filters, and resonators at the stage of selecting the geometry and topology of integrated inductors.

Keywords: integrated inductor, quality factor, parameter frequency dispersion, self-resonance, parasitic capacitance, microwave circuit topology, fractal structures.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-2-7-15

References

1. Nguyen N.M., Meyer R.G. Si IC-Compatible Inductors and LC Passive Filters. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1990, vol. 25, no. 4, pp. 1028–1031.
2. Egoshin Yu.I., Tyumentseva A.A., Timoshenko T.S., Yakovlev A.N. [Assessment of the influence of design parameters of integral lc filters on their frequency characteristics]. *Radio communication technology*, 2025, no. 1 (64), pp. 64–71 (in Russ.).
3. Dubrovin V.S. [Assessment of the stability of frequency characteristics of controlled phase shifter]. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: management, computer science and informatics*, 2015, no. 4, pp. 92–100 (in Russ.).
4. Alimov A.P., Zmiy B.F. [Modelling and design of second-order selective amplifiers]. *Informatika: problemy, meto-*

dologiya, tekhnologii. Materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-metodicheskoy konferentsii [Informatics: problems, methodology, technologies. Proc. of the XVI International scientific and methodological conference], Voronezh, February 11–12, 2016. Voronezh, Nauchno-issledovatel'skie publikatsii Publ., 2016, pp. 16–21 (in Russ.).

5. Arzhanov V.A., Naumenko A.P., Odinets A.I., Bagaeva T.V. *Ustroystva priema i obrabotki signalov v uprazhneniyakh i zadachakh* [Signal reception and processing devices in exercises and problems]. Omsk, OmGTU Publ., 2018, 255 p. (in Russ.).
6. Drakakis S., Michailidis A., Tzagkas D., Pavlidis V.F., Noulis T. A design methodology for RF/mmWave LNAs in 22 nm FD-SOI with cross-coupling-aware nested inductors and on-chip baluns. *Electronics*, 2025, vol. 15, no. 1, art. 25.
7. Widjaja A., Sarangan A. *Thin film structures with negative inductance and methods for fabricating inductors comprising the same*. Patent USA, no. 7956715 B2, 2011.
8. Chen L., Qiao Z., Liu S., Noulis T. High inductance density in CMOS-compatible magnetically integrated 3D microinductors for radio-frequency applications. *Nature Communications*, 2025, vol. 16, no. 1, p. 10072.
9. Ezhilarasu G., Iyer S.S. Integrated micro-capacitors and micro-inductors for next generation electronics. *IEEE Nanotechnology Magazine*, 2024, vol. 18, no. 2, pp. 30–40.
10. Mi X., Ueda S. High-frequency applications. In: *Advanced Microwave Circuits and Systems*, ed. V. Zhurbenko. Hamburg, BoD – Books on Demand Publ., 2010, pp. 249–268.
11. Shin K.R., Arendell J., Eilert K. Compact 5G n77 band pass filter with through silicon via (TSV) IPD technology. 2019 IEEE 20th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Cocoa Beach, FL, USA, April 2019. New York, IEEE Publ., 2019, pp. 1–3.
12. Shaltout A.H., Gregori S. Layout optimization of planar inductors for high-efficiency integrated power converters. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2020, vol. 102, no. 1, pp. 155–167.
13. Ptitsyn D.V., Ptitsyna E.V., Kuvaldin A.B. [On the influence of parameters of a variable inductor on the power value measured in RLC circuits]. *Energo- i resursosberezhniye XXI vek. Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii* [Energy and resource saving XXI century. Proc. of the XII International scientific and practical internet conference], Oryol, March–June 2014. Oryol, 2014, pp. 61–64 (in Russ.).
14. Choi M.S., Kim S.J., Lee Y.S., Cho C.H., Seong I.H., Jeong W.N., You S.J. Computational analysis on self-resonance frequency of solenoid and planar inductor. *Applied Science and Convergence Technology*, 2023, vol. 32, no. 2, pp. 54–57.
15. Agarkov N.E. [Influence of parasitic capacitance of the matching circuit on the insertion losses of the antenna matching device]. *Radio communication technology*, 2025, no. 1 (64), p. 40–55 (in Russ.).
16. Ondica R., Kovac M., Hudec A., Ravasz R., Maljar D., Stopjakova V., Arbet D. An overview of fully on-chip inductors. *Radioengineering*, 2023, vol. 32, no. 1, pp. 11–22.
17. Spataro S., Sapone G., Giuffrida M., Ragonese E. A Geometrically Scalable Lumped Model for Spiral Inductors in Radio Frequency GaN Technology on Silicon. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 13, p. 2665.
18. Chen H.H., Hsu Y.W. Analytic Design of On-Chip Spiral Inductor with Variable Line Width. *Electronics*, 2022, vol. 11, no. 13, p. 2029.
19. Mariappan S., Rajendran J., Idros N., Manaf A.A., Kumar N., Alghaihab A., Yarman B.S. A review of engineering techniques for CMOS on-chip inductor design and quality factor enhancement from MHz-to-GHz frequency domains. *IEEE Access*, 2025, vol. 13, p. 140473–140499.

20. Boreyko D.A. *Usovershenstvovannyi podkhod k modelirovaniyu integral'nykh komponentov dlya LC-fil'trov* [An improved approach to modeling integrated components for LC-filters]. Diss. Omsk, OmGTU, 2017, 187 p. (in Russ.).
21. Erokhin V.V., Zavyalov S.A. Vliyaniye kharakteristik tekhnologicheskogo protsessa na proektirovaniye SVCH LC-fil'trov v SNK [Influence of process characteristics on the design of microwave LC filters in SoC]. *Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh sistem. Materialy IX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Experience exchange in the field of ultra-wideband radio-electronic systems. Proc. of the IX All-Russian scientific and technical conference], Omsk, April 26–27, 2022. Omsk, OmGTU Publ., 2022, pp. 108–117 (in Russ.).
22. Wu N., Hu Y., Sun S. Microstructure Characterization and Interfacial Reactions between Au-Sn Solder and Different Back Metallization Systems of GaAs MMICs. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 6, art. 1266.
23. Boshchik I.M. *Postroyeniye modeley passivnykh elementov i avtomatizirovannoye proyektirovaniye SVCH monolitnykh usilitel'ey s uchetoм vliyaniya temperatury* [Building models of passive elements and computer-aided design of microwave monolithic amplifiers considering temperature effects]. Cand. Diss. Tomsk: TUSUR, 2012, 199 p. (in Russ.).
24. Namoune A., Taleb R., Benzidane M.R., Melati R., Mansour N., Benbouzid Z., Saidi H. Effect of differently shaped spiral inductors on micro power integrated circuit. *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 38–46.
25. Boreyko D.A., Dyachenko T.S., Tyumentsev A.I. *Issledovaniye parametrov katushek induktivnosti, vypolnennykh po LTCC tekhnologii* [Investigation of parameters of inductors made using LTCC technology]. *Radio communication technology*, 2012, no. 17, pp. 73–83 (in Russ.).
26. Tayenjam S., Vanukuru V., Sundaram K. High-Q variable pitch spiral inductors for increased inductance density and figure-of-merit. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, vol. 66, no. 10, pp. 4481–4485.
27. Chavva S., Raja I. Experimental analysis of irregularly shaped octagonal on-chip inductors for improving area-efficiency in CMOS RFICs for millimeter wave applications. *Integration*, 2025, vol. 100, p. 102259.
28. Shaltout A.H., Gregori S. Layout optimization of planar inductors for high-efficiency integrated power converters. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2020, vol. 102, no. 1, pp. 155–167.
29. Chavva S., Raja I. N-well patterning of P-type CMOS substrate for improving quality factor of on-chip inductors at millimeter wave frequencies. *2025 38th International Conference on VLSI Design and 2024 23rd International Conference on Embedded Systems (VLSID)*, January 2025. New York, IEEE Publ., 2025, pp. 186–190.
30. Bjelica J.M., Djuric N.M., Djuric S.M. Modeling and performance analysis of planar fractal inductors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, vol. 56, no. 11, pp. 1–8.
31. Alpaslan H., Yuce E., Minaei S. A new active device namely S-CCI and its applications: simulated floating inductor and quadrature oscillators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2022, vol. 69, no. 9, pp. 3554–3564.
32. Cayron A., Viallon C., Bushueva O., Ghannam A., Parra T. High-performance compact 3-D solenoids for RF applications. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, vol. 28, no. 6, pp. 479–481.
33. Hao W., Li X., Pan Z., Miao R., Yue Z., Yang C., Wang A.Z. Advances and perspectives in magnetic-integrated inductors for RF ICs. *IEEE Transactions on Materials for Electron Devices*, 2024, vol. 1, pp. 106–120.
34. Kiran Kumar G., Kobaku T., Sahoo S., Subudhi B., Elangovan D., Blaabjerg F. An overview of fully integrated switching power converters based on switched-capacitor versus inductive approach and their advanced control aspects. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 11, p. 3250.
35. Wouters H., Martinez W. Integrated inductor-transformers for high-frequency converters: an overview. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, vol. 40, no. 9, pp. 13157–13176.
36. Sanchis-Kilders E., Ferreres A., Gasent-Blesa J.L., Maset E., Esteve V., Jordan J., Ejea J.B. Stability improvement of isolated multiple-output DC/DC converter using coupled inductors. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 1644–1653.
37. Chen J., Wang Z.J., Zhu B.H., Kim E.S., Kim N.Y. Fabrication of QFN-packaged miniaturized GaAs-based band-pass filter with intertwined inductors and dendritic capacitor. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 8, p. 1932.
38. Kim Y., Lee J., Kim S., Park C. Experimental evaluation of coupled-line tunable inductors with switchable mutual coupling. *Electronics*, 2025, vol. 14, no. 16, p. 3228.
39. Kolahian P., Grimm F., Baghdadi M. A comprehensive review on planar magnetics and the structures to reduce the parasitic elements and improve efficiency. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 7, p. 3254.
40. Shahabi Ghahfarokhi N. Minimising capacitive couplings and distributing copper losses in planar magnetic elements. Masters by Research thesis. Brisbane, Queensland University of Technology, 2010.
41. Lope I., Carretero C., Acero J. First self-resonant frequency of power inductors based on approximated corrected stray capacitances. *IET Power Electronics*, 2021, vol. 14, pp. 257–267.

Sergey V. Vlasov

Postgraduate student, Assistant, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-3848-1079
Phone: +7 (382-2) 41-36-43
Email: sergei.v.vlasov@tusur.ru

Yevgeniy S. Zhechev

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Microwave and Quantum Radio Engineering, TUSUR
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-4469-7033
Phone: +7 (382-2) 41-36-43
Email: zhechev75@gmail.com

Received: 01.04.2026.

Accepted: 27.08.2026.