

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АКАДЕМИЯ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ КОСМОНАВТИКИ имени К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ» РАН
(ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР РАН имени А. А. ДОРОДНИЦЫНА)
АО «УПКБ "ДЕТАЛЬ"», АО «РАДИОЗАВОД»,
АО «ФНПЦ «ПО "СТАРТ" имени М. В. ПРОЦЕНКО», АО «НИИЭМП»
АО «ПНИЭИ», АО «НИИФИ», АО «НПП "РУБИН"»
ЕВРАЗИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Л. Н. ГУМИЛЕВА
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



ТРУДЫ
МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО

*Посвящается 300-летию
Российской академии наук*

Том 2

ПЕНЗА 2024

Труды Международного симпозиума НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО. – 2024. – Т. 2. – 503 с.

Представлены доклады XXIX Международного симпозиума «Надежность и качество», посвященного 300-летию Российской академии наук, проходившего с 27 мая по 1 июня 2024 г. в г. Пензе.

Рассмотрены актуальные проблемы теории и практики повышения надежности и качества; эффективности внедрения инновационных и информационных технологий в фундаментальные научные и прикладные исследования, образовательные и коммуникативные системы и среды, экономику и юриспруденцию; методов и средств анализа и прогнозирования показателей надежности и качества приборов, устройств и систем, а также анализа непараметрических моделей и оценки остаточного ресурса изделий двойного назначения; ресурсосбережения; проектирования интеллектуальных экспертных и диагностических систем, систем управления и связи, интерактивных, телекоммуникационных сетей и сервисных систем; экологического мониторинга и контроля состояния окружающей среды и биологических объектов; исследования физико-технологических процессов в науке, технике и технологиях для повышения качества выпускаемых изделий радиопромышленности, приборостроения, аэрокосмического и топливно-энергетического комплексов, электроники и вычислительной техники и др.

Издание предназначено для студентов, аспирантов, ученых и научных сотрудников, заинтересованных в исследовании надежности и качества эффективных комплексных систем.

УДК 621.396.6:621.315.616.97:658:562

Оргкомитет благодарит за поддержку в организации и проведении Международного симпозиума и издании настоящих трудов Министерство науки и высшего образования РФ, Правительство Пензенской области, Академию проблем качества РФ, Российскую академию космонавтики имени К. Э. Циолковского, Российскую инженерную академию, ФИЦ ИУ РАН (Вычислительный центр РАН имени А. А. Дородницына), АО «УПКБ “ДЕТАЛЬ”», АО «НИИФИ», АО «ПНИЭИ», АО «НПП “РУБИН”», АО «РАДИОЗАВОД», АО «ППО “ЭЛЕКТРОПРИБОР”», АО «ФНПЦ «ПО “СТАРТ” имени М. В. Проценко», АО «НИКИРЭТ», ООО «Экспериментальная мастерская “НаукаСофт”», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Пензенский государственный университет.

Издание зарегистрировано в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) с 2005 г.

Редакционная коллегия:

Юрков Н. К. – главный редактор;

Трусов В. А. – ответственный секретарь;

**Гуляков А. Д., Майстер В. А., Северцев Н. А., Сыдыков Е. Б., Абрамов О. В.,
Артамонов Д. В., Безродный Б. Ф., Бецов А. В., Васин С. М., Дивеев А. И., Иофин А. А.,
Каиштанов В. А., Кемалов Б. К., Острейковский В. А., Пиганов М. Н.,
Роберт И. В., Романенко Ю. А., Савченко В. П., Садыхов Г. С., Увайсов С. У.,
Халютин С. П., Шайко-Шайковский А. Г., Шахнов В. А., Якимов А. Н.**

РАСЧЁТ ТОПОЛОГИИ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Рассмотрена зависимость индуктивности, добротности и собственной резонансной частоты тонкоплёночной катушки индуктивности от конструктивных параметров. Предложена методика инженерного расчета топологии тонкоплёночных индуктивностей с помощью номограмм.

Ключевые слова: тонкие плёнки, тонкоплёночные индуктивные элементы, индуктивность, добротность, резонансная частота

Golovyashkin¹ A.N., Malyshev² S.A.^{1,2} Penza State University, Penza, Russia¹ angpenza@yandex.ru² hasep4ik@outlook.com

CALCULATION OF THE TOPOLOGY OF THIN-FILM INDUCTIVE ELEMENTS

Annotation. The dependence of inductance, Q-factor and intrinsic resonant frequency of a thin-film inductance coil on structural parameters is considered. A technique for engineering calculation of the topology of thin-film inductivity using nomograms is proposed.

Keywords: thin films, thin-film inductive elements, inductance, Q-factor, resonant frequency

Введение

По тонкоплёночной технологии индуктивность реализуется в виде так называемой круглой или квадратной спирали, которая вначале формируется вакуумными методами напыления на диэлектрической подложке, а затем, для увеличения добротности спирали, её витки наращивают электрохимическим способом до толщины 10–30 мкм [1–2]. Поэтому термин «тонкоплёночная индуктивность» следует считать условным. Кроме того, расчёт этих элементов сопряжён с большими погрешностями. По этим причинам в тонкоплёночных интегральных микросхемах (ИМС) и микросборках (МСБ) они практически не используются. Однако в настоящее время возникла необходимость возобновить активное применение тонкоплёночных микросхем и микросборок в специальных радиотехнических системах и изделиях электронной техники из-за их высокой помехозащищённости, а исключение индуктивностей из схемотехнических решений усложняет устройства и, в ряде случаев, ограничивает функциональные возможности. Поэтому возникла необходимость восстановить утраченную компетенцию по проектированию и применению тонкоплёночных индуктивных элементов.

Конструкция индуктивности определяется следующими параметрами: внешний и внутренний размеры (диаметр или сторона квадрата) спирали D и d , соответственно; расстояние между витками r ; ширина b и толщина токопровода h . Для расчета топологии индуктивности необходимо определить однозначное соответствие между ее электрическими характеристиками (индуктивность L , добротность Q , собственная резонансная частота f_0) и конструктивными параметрами. При применении обычных способов расчёта полученные результаты плохо согласуются с экспериментом, особенно в отношении добротности. Поэтому при конструировании ИМС и МСБ необходимо применять специальные методы для подстройки индуктивности и задавать большие запасы добротности. Но в этом случае увеличиваются габариты и вес устройства. Ниже приводится и обосновывается методика инженерного расчета топологии тонкоплёночной индуктивности, позволяющая избежать эти недостатки.

Методика расчета.

Зависимость индуктивности от ее конструктивных параметров определяли на физической модели тонкоплёночной микросхемы, геометрические размеры спирали которой увеличены в 20 раз. Основные принципы построения физической модели изложены в [3]. Результаты моделирования зависимости индуктивности, собственной резонансной частоты и параметра q от конструктивных параметров, представленные в виде номограмм, приведены на рис. 1, 2 для круглой и квадратной спирали [4].

Данные номограммы построены для получения максимально возможной удельной индуктивности. Для этого расстояние между витками и внутренний диаметр элемента должны быть минимально возможными: $r = 100$ мкм и $d = 500$ мкм.

Для определения добротности тонкоплёночной спирали введем параметр

$$\eta = \frac{L}{n} \quad (1)$$

где L – индуктивность спирали, Гн; n – число квадратов токопровода спирали.

Величина добротности в этом случае определяется по формуле

$$Q = \frac{\eta \omega}{\rho_0(\omega)}, \quad (2)$$

где ω – угловая рабочая частота, сек⁻¹; $\rho_0(\omega)$ – удельное сопротивление токопровода, Ом/□.

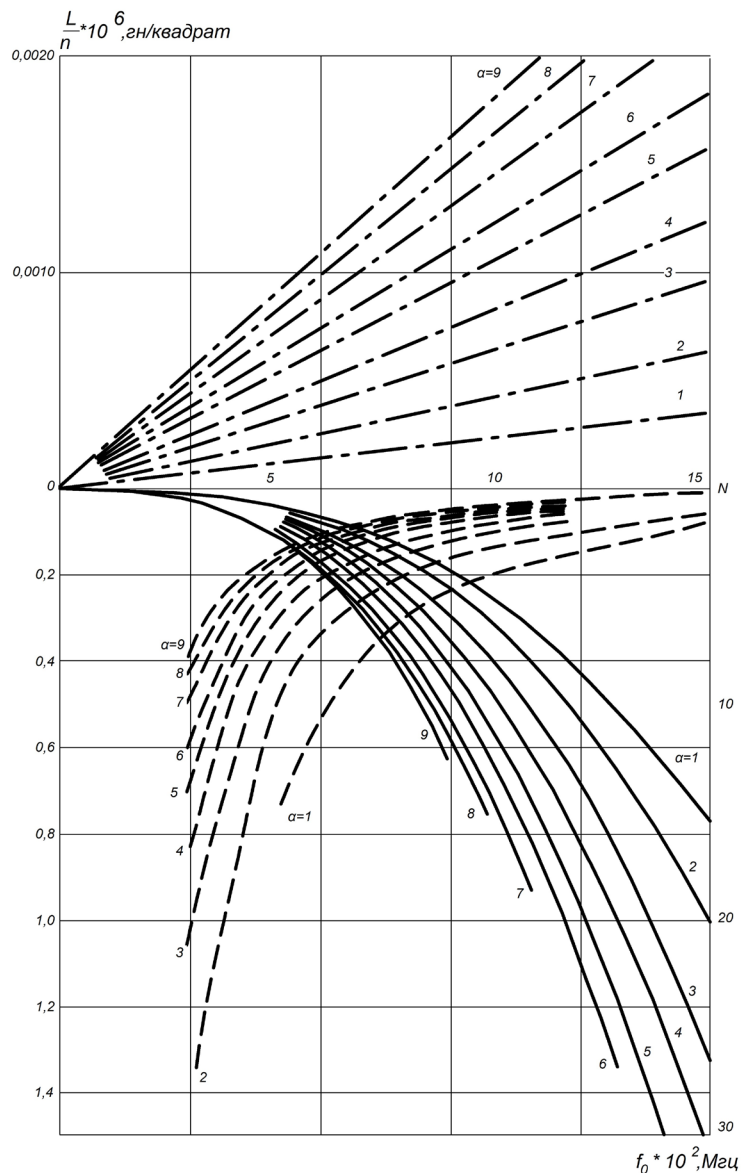


Рисунок 1 – Зависимость индуктивности (сплошные линии), собственной резонансной частоты (пунктирные) и параметра $\eta = L/n$ (штрих-пунктирные) круглой спирали от числа витков N при различных значениях α

Индуктивность формируется на подложке из ситалла или высокочастотной керамики и работает на частотах до нескольких сотен мегагерц, поэтому при определении добротности (2) не учитывается частотная зависимость потерь в подложке. Коэффициент η в первом приближении можно считать не зависимым от частоты. Частотная зависимость $\rho_0(\omega)$ обусловлена вытеснением тока на поверхность токопровода (скин-эффект) [1]. Поперечное сечение токопровода – прямоугольник со сторонами b и h . В случае уединенного проводника плотность тока неравномерно распределена по периметру этого прямоугольника. В проводнике, расположенном в непосредственной близости с проводниками, лежащими в одной плоскости, происходит выравнивание этой неравномерности за счет действия эффекта близости [1]. Это позволяет предположить, что плотность тока равномерно распределена по ширине токопровода b , и рассматривать расчетную модель токопровода спирали в виде широкой плоской ленты толщиной h . Возможность такого упрощения подтверждена экспериментально.

Известно, что глубину проникновения поля в проводник можно вычислить по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_{уд}}{\omega\mu}}, \quad (3)$$

где δ – глубина проникновения, м; $\rho_{уд}$ – удельное сопротивление, Ом·м.

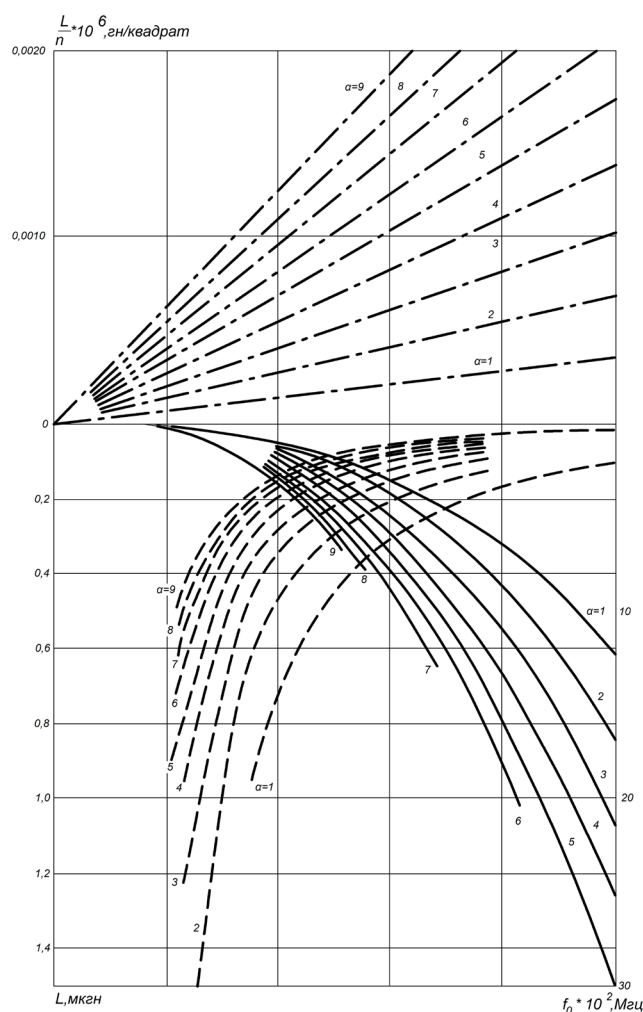


Рисунок 2 – Зависимость индуктивности (сплошные линии), собственной резонансной частоты (пунктирные) и параметра $\eta = L/n$ (штрих-пунктирные) квадратной спирали от числа витков при различных значениях α

При этом плотность тока будет затухать по толщине токопровода по закону, близкому к экспоненциальному (начало координат на поверхности токопровода, ось x перпендикулярна ей),

$$j = j_0 e^{-\frac{x}{\delta}}, \quad (4)$$

где j_0 – плотность тока на поверхности проводника.

Суммарный ток I , протекающий по токопроводу, будет равен:

$$I = 2 \int_0^{\frac{h}{2}} j_0 e^{-\frac{x}{\delta}} dx = 2\delta j_0 (1 - e^{-\frac{h}{2\delta}}).$$

Отсюда искомое удельное сопротивление токопровода

$$\rho_0(\omega) = \frac{\rho_{уд}}{2\delta(1 - e^{-\frac{h}{2\delta}})}. \quad (5)$$

Если подставить значение $\rho_0(\omega)$ из (5) в формулу (2), величина добротности будет в 2-3 раза больше реальной. Это расхождение можно объяснить следующим образом. При выводе формулы (5) предполагалось, что материал токопровода аморфный, а его поверхность абсолютно гладкая. В действительности поверхность проводника шероховатая (величина шероховатости колеблется от 4 до 10 мкм), а структура кристаллическая (токопровод изготавливается методом электрохимического наращивания). Наличие шероховатости на поверхности токопровода можно интерпретировать увеличением длины токопровода.

В этом случае

$$\rho_0(\omega) = \frac{K(\omega)\rho_{уд}}{2\delta(1 - e^{-\frac{h}{2\delta}})}. \quad (6)$$

где $K(\omega)$ – частотно-зависимый коэффициент, учитывающий наличие шероховатостей на поверхности.

Коэффициент $K(\omega)$ определялся экспериментально, итоговая зависимость $\rho_0(\omega)$ с учетом для случая $\rho_{уд} = 2,4 \cdot 10^{-8}$ Ом·м приведены на рис. 3 [3]. Если технология изготовления индуктивности обеспечивает токопровод с удельным сопротивлением

$\rho^*_{уд}$ отличающимся от приведённого значения, необходимо значения по оси абсцисс и ординат (рис. 4) умножить на коэффициент $m = \rho_{уд}/\rho^*_{уд}$ и $1/m$, соответственно.

Тонкопленочная катушка индуктивности соединяется с микросхемой проводниками, диаметр которых не более 0,2 мм; в противном случае может произойти отслоение токопровода от подложки. Общая длина подводящих проводников приблизительно равна 1 см. Зависимость сопротивления подводящих проводников от частоты для различных значений диаметров приведена в [4]. Расчеты показали, что с учетом этого сопротивления значение добротности уменьшается на 30% в зависимости от номинала индуктивности.

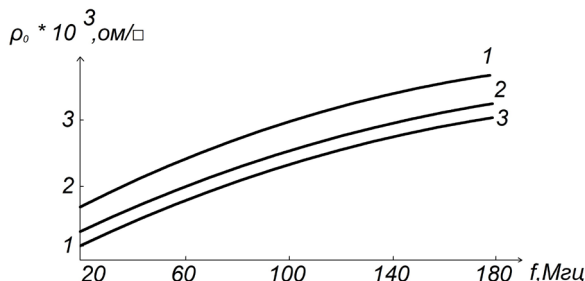


Рисунок 3 – Зависимость удельного поверхностного сопротивления токопровода от частоты и толщины. $h=20; 30; 40$ мкм (кривые 1-3)

Собственную резонансную частоту спиральной индуктивности достаточно точно можно определить, заменив спираль эквивалентной длиной линии, длина которой l должна равняться длине токопровода спирали. Резонанс возникает на частоте, на которой длина линии равна четверти длины электрической волны, а именно

$$f_0 = \frac{1}{4} \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}} \frac{1}{l}, \quad (7)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость подложки; f_0 – собственная резонансная частота спирали, Гц; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

Порядок расчета по серии номограмм (см. рис. 1-2) зависит от требований, предъявляемых к топологии. Наиболее часто топологию индуктивности рассчитывают:

по заданной величине индуктивности и рабочей частоте с максимально возможной величиной добротности;

по заданному номиналу индуктивности и рабочей частоте на минимально возможной площади;

по заданным величинам индуктивности, добротности и рабочей частоты.

Расчет топологии индуктивности с максимально возможной добротностью. Известно, что для одного и того же номинала индуктивности длина токопровода круглой спирали меньше, чем квадратной, т. е. у круглой спирали меньше активное сопротивление и выше добротность. Поэтому при решении данной задачи лучше выбирать круглую форму спирали.

Максимальная добротность достигается при максимальном значении параметра $\alpha = b/p$, так как при больших α заданная величина индуктивности реализуется с меньшим числом витков, т. е. с меньшей длиной токопровода.

Как отмечалось выше, все номограммы, приведенные на рис. 1 и 2 построены для внутреннего диаметра спирали, равного минимально возможной ширине контактной площадки ($d=500$ мкм). Однако при увеличении d от нуля до некоторого значения добротность катушки возрастает на 15-20%. Имеется оптимальное отношение внутреннего и внешнего диаметров спирали, при которых добротность максимальна. Для круглой катушки

$$\left(\frac{d}{p}\right)_{\text{опт}} = 0,4, \quad (9)$$

для квадратной спирали

$$\left(\frac{d}{p}\right)_{\text{опт}} = 0,362, \quad (10)$$

Но при увеличении внутреннего диаметра (выборке внутренних витков) до величины, удовлетворяющей соотношениям (9-10), индуктивность спирали уменьшается на 14%. В данном случае топологию рассчитывают в следующей последовательности:

заданное значение индуктивности увеличивают на 14%;

по номограммам рис. 1 определяют число витков спирали, соответствующее полученному ранее значению индуктивности для максимального значения α ;

определяют величину внешнего диаметра спирали по формуле

$$D = 0,02 (1 + \alpha) N \text{ (см)}; \quad (11)$$

из уравнения (9) определяют внутренний диаметр спирали d ;

по полученным α и N (см. рис. 1) определяют значение параметра η ;

по заданной рабочей частоте определяют (см. рис. 3) значение удельного поверхностного сопротивления;
по формуле (2) рассчитывается добротность спирали;
расчетное значение добротности на 15%;
по номограммам, приведенным на рис. 1, определяют собственную резонансную частоту индуктивности.

Часто в числе задаваемых параметров присутствует ограничение по занимаемой площади. В этом случае значение параметра α выбирается максимальным из условия удовлетворения ограничений по занимаемой площади.

Расчет топологии индуктивности на минимальной занимаемой площади. Минимально занимаемую площадь получают при квадратной форме спирали, минимальном α и внутреннем диаметре, равном нулю.

В связи с этим расчет производится в следующей последовательности:

по номограммам рис. 2 для заданного значения индуктивности и минимального α определяют число витков спирали и значение η ;

по заданной рабочей частоте определяют (см. рис. 3) значение удельного сопротивления;

рассчитывают добротность индуктивности;

определяют частоту собственного резонанса спирали из рис. 2.

Расчет топологии индуктивности по заданным значениям добротности и индуктивности производится в следующей последовательности:

определяют значение удельного сопротивления из рис. 3;

заданное значение добротности уменьшают на 15%;

по формуле (2) рассчитывают значение параметра η по r_0 и Q ;

полученное значение η откладывают по оси ординат рис. 1 и проводят горизонтальную линию;

увеличивают заданное значение индуктивности на 14% и откладывают его на оси ординат рис. 1; проводят горизонтальную линию;

передвигая линейку параллельно оси ординат, определяют число витков спирали. Пересечение линейки с проведенными линиями должно при этом находиться на кривых с одинаковым значением параметра α . Если такое пересечение отсутствует, значит заданная индуктивность не может быть реализована с заданной добротностью;

определяют значения внутреннего и внешнего диаметров;

из рис.1 находят частоту собственного резонанса индуктивности.

Заключение

Для упрощения составления и использования номограмм были зафиксированы некоторые конструктивные параметры спиралей, а именно: расстояния между витками r и внутренний диаметр d (выбраны исходя из технологических ограничений и соответственно равны 100 и 500 мкм). В действительности, проведя простые расчеты, можно распространить эту методику для произвольных значений r и d .

Можно показать, что изменение геометрических размеров спирали в K_1 раз изменяет индуктивность системы в K_e раз. Поясним это на примере. Пусть $r = 50$ мкм, $d = 250$, т.е. $K_e = 1/2$. Для расчета индуктивности с указанными параметрами необходимо значения на осях L/n и L (рис. 1-2) уменьшить в 2 раза. В остальном порядок расчета полностью совпадает с порядком, приведенным выше.

При проведении расчетов можно с достаточной для инженерной практики точностью полагать $d = 500$ мкм, поскольку при изменении d от нуля до $d_{\text{опт}}$, значение индуктивности изменяется на 14%.

Используя формулу (7), можно показать, что собственные резонансные частоты f_0 указанных выше индуктивностей будут подчиняться соотношению $f_{01} = \frac{1}{K_e} f_{02}$.

Это означает, что при изменении геометрических размеров согласно в K_e раз собственная резонансная частота индуктивности изменяется в $1/K_e$ раз. В рассмотренном выше примере для правильного определения резонансной частоты необходимо значения по оси f_0 увеличить в 2 раза. Таким образом, можно достаточно просто рассчитывать спиральные индуктивности с произвольным расстоянием между витками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тонкоплёночная электроника: учебник / А. Н. Головяшкин. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2022. – 284 с.
2. Аверин И.А., Головяшкин А.Н. Физика и технология тонких пленок: учеб. пособие / Под ред. проф. Р.М. Печерской. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009
3. Расчет топологии тонкоплёночных катушек индуктивности / Ермолаев А.А., Ядов В.И. // Электронная техника: сер. VI, «Микроэлектроника», 1969, вып. 5(20).
4. Способ моделирования пассивных ТП микросхем / Гросберг Л.Е., Ермолаев А.А., Шер Ю.А. // Электронная техника: сер. VI, «Микроэлектроника», 1966, вып. 2.