

Разработка высокочастотных электрических схем замещения конденсаторов и дросселей с учетом частотных свойств диэлектрической и магнитной проницаемости диэлектриков и магнетиков

В.Ф. Дмитриков¹, А.Ю. Петроченко²,
Л.Е. Фрид³, А.Е. Беляев¹, З.В. Зайцева¹

- ¹ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича
193232, Россия, г. Санкт-Петербург,
пр. Большевиков, 22, к. 1
² АО «Концерн «НПО «Аврора»»
194021, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Карбышева, 15
³ ООО «Северо-Западная Лаборатория»
196128, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Варшавская, 5А

Аннотация – Переключение силовых полупроводниковых приборов в источниках вторичного электропитания является основным источником электромагнитных помех. Чтобы соответствовать стандартам электромагнитной совместимости необходимо снизить уровень кондуктивных помех. Это снижение может быть достигнуто различными методами, включая фильтры радиопомех, технология изготовления которых основана на использовании катушек индуктивности (дросселей) и конденсаторов. Дроссели и конденсаторы являются ключевыми элементами при разработке фильтров радиопомех и требуют знания их точных высокочастотных моделей в широком диапазоне частот до 100 МГц и выше. Статья посвящена разработке высокочастотной модели конденсаторов и дросселей на основе электрических эквивалентных схем, параметры которых выражены либо через электрофизические величины, либо через частотно-зависимую диэлектрическую проницаемость диэлектрика и магнитную проницаемость магнитопровода. Результаты моделирования подтверждаются измерениями импедансов конденсатора с диэлектриком на основе сегнетоэлектрика и пироэлектрика и дросселя с сердечником из нанокристаллического сплава на основе железа ГМ414.

Ключевые слова – преобразователь мощности, электромагнитная совместимость, эквивалентная электрическая схема, диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, фильтр радиопомех.

Введение

В настоящее время при разработке моделей компонентов ФРП (дросселей и конденсаторов) в широком диапазоне частот до 100 МГц и выше в отечественной и зарубежной литературе имеются два основных подхода [1–4]. В одном подходе основной проблемой разработки ФРП в широком диапазоне частот считают искажения частотных характеристик импеданса дросселей и конденсаторов из-за «паразитных» элементов. Основным паразитным элементом дросселя считается межвитковая емкость обмотки дросселя [1–3]. Это небольшая емкость, которая существует между всеми проводами и обмотками, где разность напряжения между витками ведет себя подобно конденсатору. Этот конденсатор при высокой частоте единицы-десятки мегагерц и выше действует как шунт и позволяет высокочастотному переменному току протекать в обход обмоток. Частота, при которой это явление становится проблемой, выше

частоты «авторезонанса» обмотки. Выше частоты «авторезонанса» влияние «паразитной емкости» становится больше влияния индуктивности дросселя. Это снижает уровень затухания ЭМП при высоких частотах. В [2] рассматриваются методы снижения «паразитной емкости» дросселя путем оптимизации только конструкции обмотки. Не учитываются емкости, обусловленные материалом сердечника дросселя, вызванной нелинейной зависимостью частотной характеристики комплексной магнитной проницаемости материала сердечника.

Относительно второго компонента ФРП конденсатора следует сослаться на источник [1], где отмечается: «На высоких частотах собственная (примечание: “паразитная”) индуктивность конденсатора приводит к появлению резонанса, который может приводить к нежелательному влиянию на электрические цепи. Собственная индуктивность образуется выводами конденсатора, а также зависит от того, как выполнены диэлектрические

обкладки и их металлизация. Для снижения собственной индуктивности токовые проводники конденсатора должны быть выполнены бифилярно, а контакты внутри конденсатора, выполненные металлической фольгой, должны иметь достаточную поверхность. На частотах выше резонансной конденсатор становится индуктивным элементом, теряя свои основные свойства». Автором этой монографии не учитываются индуктивности конденсатора, свойственные материалу диэлектрика конденсатора и обусловленные нелинейной зависимостью частотной характеристики комплексной диэлектрической проницаемости диэлектрика конденсатора.

До сих пор отечественные производители радиокомпонентов (РК) ФРП в конструкторской документации не приводят ВЧ-модели конденсаторов и дросселей с учетом влияния свойств материалов на паразитные параметры конденсаторов и дросселей, обусловленных нелинейными частотными зависимостями вещественной и мнимой составляющих диэлектрической и магнитной проницаемости диэлектриков и сердечников. Не приводят и значения паразитных элементов конденсаторов и дросселей. Неполный учет «паразитных параметров» в дросселях и конденсаторах приводит часто к недопустимо большим погрешностям расчета конденсаторов и дросселей в ФРП.

Так, при определении паразитной индуктивности «керамических» ЧИП-конденсаторов с учетом только геометрических параметров выводов и металлизированных слоев и обкладок расчетная величина паразитной индуктивности в разы меньше измеренной. Расчетная величина «паразитной емкости» дросселей также много меньше измеренной. С позиций, изложенных в [1–5], упомянутые факты не могут быть объяснены.

Не имея поведенческие ВЧ-модели конденсаторов и дросселей от их производителей, разработчики радиоэлектронной аппаратуры вынуждены разрабатывать их сами, осуществляя формализованный структурно-параметрический синтез в виде эквивалентных электрических схем замещения, используя экспериментально измеренные импедансы конденсаторов и дросселей [5].

Данный метод позволяет получить эквивалентные электрические схемы замещения, частотные характеристики которых с необходимой точностью совпадают с измеренными импедансами конденсаторов и дросселей. Однако данный метод, рассматривающий РК как «черный ящик», обладает рядом существенных недостатков, огра-

ничающих возможности его применения в инженерной практике, а именно:

- полученные эквивалентные электрические схемы замещения конденсаторов и дросселей напрямую не учитывают ни характеристики, определяющие свойства материалов диэлектриков конденсаторов или магнитных материалов сердечников дросселей, ни особенности конструкции конденсаторов и дросселей;

- полученные эквивалентные электрические схемы замещения не позволяют разработчикам конденсаторов и дросселей ответить на важный вопрос: что необходимо сделать с конструкцией конденсаторов и дросселей и электрофизическими характеристиками материала, чтобы улучшить их частотные свойства, т. е. уменьшить их «паразитные» параметры;

- данный метод формально позволяет определить эквивалентные электрические схемы замещения конденсаторов и дросселей, частотные характеристики которых с заданной точностью совпадают только в измеренных образцах конденсаторов и дросселей. Для всей серийной партии данный метод имеет большую погрешность. Это обусловлено большой температурной нестабильностью параметров конденсаторов и дросселей и большим разбросом параметров от одного экземпляра к другому.

Так, например, температурная нестабильность номинального значения керамических конденсаторов типа Н90 в диапазоне от +85 °С до минус 60 °С достигает 90 %, для конденсаторов Н50 – 50 %; для конденсаторов Н30 – 30 %. Поэтому на практике данный метод определения ВЧ поведенческой модели изготовленной партии РК имеет большую погрешность, в конечном итоге потребует итерационного расчета и повторных экспериментальных измерений.

1. Анализ литературных источников по разработке динамических ВЧ-моделей конденсаторов и дросселей с учетом свойств материалов диэлектриков и сердечников

В [6–13] ВЧ-модель катушки получена на основе экспериментальных измерений и представляет собой эквивалентную электрическую цепь. Модель учитывает свойства материала (проницаемость) и конструкции: размеры сердечника и число витков обмотки.

Недостаток такого подхода к разработке ВЧ-модели состоит в необходимости новых экспери-

ментальных измерений, когда меняются свойства материала (магнитная проницаемость) от температуры или меняется конструкция катушки (размеры сердечника, число витков), и такой подход не позволяет выделить емкости, обусловленные материалом сердечника, и емкости, обусловленные конструкцией обмотки дросселя.

В [14; 15] рассмотрена динамическая модель катушки индуктивности с учетом частотной зависимости характеристик магнитной проницаемости материала сердечника в условиях слабого сигнала. Модель содержит магнитный блок, включающий магнитную и диэлектрическую (емкостную) составляющие материала сердечника, блок паразитной емкости обмотки, блок проводов, учитывающий сопротивление проводов обмотки по постоянному току; блок ВЧ-элементов, включающий скин-эффект в проводе и эффекты линии передачи (ЛП). ВЧ-модель пригодна для реализации в программном обеспечении PSPICE.

В работах [12–14] рассматривается эффект отрицательной магнитной проницаемости, проявляющийся в ферритовых материалах. В [14; 15] рассматривается паразитная емкость обмотки дросселя, которая связана с числом витков обмотки и технологией намотки. В одном из наиболее важных и принципиальных вопросов о «паразитной емкости» катушки индуктивности авторы статьи [15] делают ошибку. С одной стороны, они отмечают наличие низкочастотного резонанса в импедансе (комплексном сопротивлении) дросселя, который не зависит от числа витков обмотки. В работах [15; 20] этот резонанс называют «размерным» резонансом, не зависящим от конструкции обмотки, а, следовательно, зависящим от материала сердечника. В другой части статьи авторы связывают величину емкости, обуславливающую этот резонанс, с числом витков (N), нелинейно зависящим от N , т. е. зависящим от числа витков. Тем самым они относят эту емкость к паразитной, которая обусловлена конструкцией обмотки дросселя, а не емкостью, обусловленной материалом сердечника. Это их принципиальная ошибка. В [13; 14; 21] отмечается наличие в вещественной комплексной составляющей магнитной проницаемости их отрицательных значений, но не показано, как величина отрицательной проницаемости связана с «паразитной емкостью» материала сердечника. Не приведены связь комплексной магнитной проницаемости сердечников с электрофизическими параметрами сердечника, являющимися первичными параметрами материала сердечника, от которых зависят его частотные свойства.

Следует особо остановиться, на наш взгляд, на статье, посвященной разработке динамической модели катушки индуктивности с кольцевым сердечником, которая получена из экспериментальных измерений и связана с характеристиками магнитного материала. Цель статьи состоит в том, чтобы создать модель электрической цепи в широком диапазоне частот, которая будет использоваться для моделирования в программном обеспечении PSPICE с учетом нелинейного частотно-зависимого поведения магнитного материала в условиях слабого сигнала.

Отмечая актуальность, значимость и оригинальность данной работы, необходимо, по нашему мнению, указать на отдельные важные недоработки и недочеты в статье, которые следует считать дальнейшим развитием этой важной проблемы.

Претендуя на полноту исследований влияния всех факторов, которые существенно усложняют модель, авторы не пытались проанализировать и сравнить количественно вклад каждого фактора и по возможности упростить модель.

Авторы не раскрывают в статье, что такое эффект линии передачи. Это эффект длинной линии, обусловленный проводами обмотки, тогда в каком режиме работает длинная линия и на какую нагрузку и т. д.?

Авторам неизвестны литературные источники, в которых рассматривались ВЧ-модели конденсаторов с учетом их электрофизических параметров, определяющих частотные зависимости диэлектрической проницаемости диэлектриков конденсатора. Статья посвящена разработке ВЧ-моделей конденсатора и катушки индуктивности с учетом их электрофизических параметров и частотных зависимостей диэлектрической и магнитной комплексных проницаемостей. В статье показано, что электрофизические параметры диэлектрика конденсатора и сердечника дросселя являются первичными параметрами материала и от них зависят параметры диэлектрической проницаемости конденсаторов и магнитной проницаемости сердечников дросселя, а следовательно, частотные характеристики конденсаторов и дросселей и фильтров радиопомех.

2. Анализ динамических процессов намагничивания сердечников дросселей и поляризации диэлектриков конденсаторов

Динамические процессы в сердечниках дросселей и в диэлектриках конденсаторов могут быть

описаны феноменологическими уравнениями (1) и (2) [16; 24; 25]

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + \beta \frac{dX}{dt} + kx = 2\mu_0 M_S H; \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + \beta \frac{dX}{dt} + kx = qE, \quad (2)$$

где x – смещение доменной границы от положения равновесия при намагниченности; m – масса доменной стенки; β – коэффициент трения доменов; k – коэффициент упругости молекул материала; μ_0 – магнитная проницаемость в вакууме; M_S – намагниченность насыщения; H – напряженность магнитного поля; q – заряд иона; E – напряженность электрического поля.

Уравнения (1), (2) составлены на основе фундаментальных исследований по теории твердого тела, описанных в работах [22; 23; 27] и посвященных технологии изготовления материалов для дросселей и конденсаторов. Коэффициенты дифференциальных уравнений (1), (2) являются электрофизическими характеристиками m , β , k , определяющими особенности динамических процессов в тех или иных материалах сердечников дросселей и диэлектриков конденсаторов. Уравнения (1), (2), составляют теоретическую основу рассматриваемых в настоящей работе вопросов. Уравнение (1) описывает процесс намагничивания ферромагнетиков, а уравнение (2) – поляризацию сегнетоэлектриков и пироэлектриков. С использованием уравнений (1) и (2) в [24; 25] получены выражения для комплексных сопротивлений $Z_L(p)$ дросселей и $Z_C(p)$ конденсаторов соответственно:

$$Z_L(p) = \frac{pL}{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1}; \quad (3)$$

$$Z_C(p) = \frac{T_0^2 p^2 + 2\xi T_0 p + 1}{pC}, \quad (4)$$

где $T_0 = \sqrt{m/k} = 1/\omega_0$ – постоянная времени колебательного процесса доменных структур; ω_0 – круговая частота; $\xi = \frac{1}{2}\beta/\sqrt{km}$ – коэффициент затуханий; p – оператор Лапласа.

Комплексные сопротивления $Z_L(p)$ и $Z_C(p)$ в (3) и (4) выражены через коэффициенты T_0 , ξ , характеризующие частотные свойства комплексных сопротивлений конденсаторов и дросселей. Значения коэффициентов T_0 , ξ определяются либо вторичными параметрами материала сердечников и диэлектриков: магнитной и диэлектрической проницаемостью $\mu(j\omega)$ и $\epsilon(j\omega)$, либо первичными параметрами материала диэлектрика конденса-

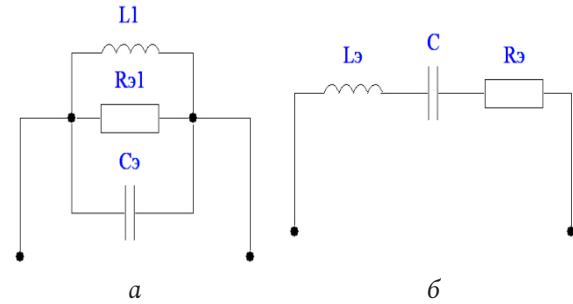


Рис. 1. Схема замещения: а – дросселя; б – конденсатора
Fig. 1. Equivalent circuit: a – choke; b – capacitor

тора и сердечника дросселя, т. е. электрофизическими параметрами m , β , k .

3. Схемы замещения импедансов сердечника дросселя и диэлектрика конденсатора

Из полученных выражений (3), (4) видно, что $Z_L(p)$ и $Z_C(p)$ является дробно-рациональными функциями с положительными вещественными коэффициентами, следовательно, эти сопротивления удовлетворяют критерию физической реализуемости двухполюсниками, составленными из сосредоточенных элементов типа R, L, C [24–26] Сопротивлению $Z_L(p)$ может быть поставлен во взаимно однозначное соответствие двухполюсник рис. 1, а, а сопротивлению $Z_C(p)$ – двухполюсник рис. 1, б.

Формулы для расчета элементов эквивалентных электрических схем рис. 1 – $L_э$, $C_э$, $R_э$ через электрофизические характеристики материалов m , β , k или по характеристикам, определяющим частотные свойства материалов T_0 , ξ , сведены в табл. 1.

Представленные в работе результаты позволяют, используя табл. 1, в зависимости от целей решаемых задач определять $L_э$, $C_э$, $R_э$ при заданных электрофизических параметрах m , β , k , являющихся первичными параметрами материала диэлектриков и сердечников или при заданных диэлектрической и магнитной проницаемостях параметрами диэлектриков и сердечников, или по требуемым частотным характеристикам $Z_L(p)$ и $Z_C(p)$ устанавливать, какие требования должны быть выставлены к электрофизическим характеристикам материалов сердечников дросселей или диэлектрикам конденсаторов с целью получения требуемых частотных характеристик $Z_L(p)$ и $Z_C(p)$.

Производители ферритов в справочной литературе обычно приводят измеренные частотные характеристики действительной ($\mu'(\omega)$) и мнимой ($\mu''(\omega)$) составляющих комплексной магнитной

Таблица 1. Формулы соответствия параметров T_0, ξ, L, C и параметров $L_{\mathcal{D}}, C_{\mathcal{D}}, R_{\mathcal{D}}$ схем замещения рис. 1
Table 1. Formulas of correspondence of parameters T_0, ξ, L, C and parameters $L_{\mathcal{D}}, C_{\mathcal{D}}, R_{\mathcal{D}}$ of equivalent circuits fig. 1

Эквивалентные параметры для схемы замещения рис. 1, а	Эквивалентные параметры для схемы замещения рис. 1, б
$L_{\mathcal{D}} = L$	$C_{\mathcal{D}} = C$
$C_{\mathcal{D}} = \frac{T_0^2}{L} = \frac{1}{\omega_0^2 L}$	$L_{\mathcal{D}} = \frac{T_0^2}{C} = \frac{1}{\omega_0^2 C}$
$R_{\mathcal{D}} = \frac{\omega_0 L}{2\xi}$	$R_{\mathcal{D}} = \frac{2\xi}{\omega_0 C}$
$T_0 = \frac{1}{\omega_0}$	$T_0 = \frac{1}{\omega_0}$
$\xi = \frac{1}{2} \frac{\mu'(0)}{\mu''(\omega_0)} = \frac{1}{2} \frac{\rho}{R_{\mathcal{D}}}$	$\xi = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon'(0)}{\varepsilon''(\omega_0)} = \frac{1}{2} \frac{R_{\mathcal{D}}}{\rho}$

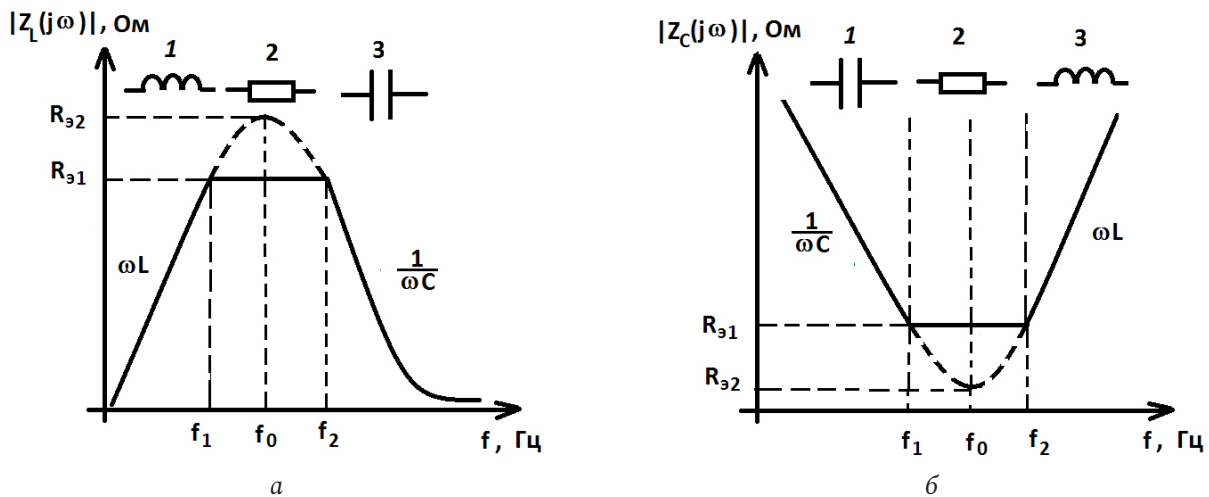


Рис. 2. ЛАХ $|Z_L(j\omega)|$ (а); $|Z_C(j\omega)|$ (б)
Fig. 2. LAH $|Z_L(j\omega)|$ (a); $|Z_C(j\omega)|$ (b)

проницаемости $\mu(j\omega)$. Из уравнений (1) и (2) могут быть получены аналитические выражения [24; 25] для $\mu'(\omega)$ и $\mu''(\omega)$:

$$\mu'(\omega) = \frac{\mu_n (1 - T_0^2 \omega^2)}{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + (2T_0 \xi \omega)^2}; \quad (5)$$

$$\mu''(\omega) = \frac{2T_0 \omega \mu_n}{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + (2T_0 \xi \omega)^2}. \quad (6)$$

Из (5), (6) могут быть найдены значения параметра ω_0 и ξ [24; 25] и далее по табл. 1 – параметры схемы замещения рис. 1.

Производители конденсаторов обычно приводят частотные характеристики модуля сопротивления $|Z_C(j\omega)|$. По частотным характеристикам $|Z_C(j\omega)|$ также могут быть определены значения ω_0 и ξ , а следовательно, и параметры $L_{\mathcal{D}}, C_{\mathcal{D}}, R_{\mathcal{D}}$ экви-

валентной электрической схемы рис. 1, б. Но при использовании модуля импедансов $|Z_C(j\omega)|$ параметры ω_0 и ξ будут определяться и свойствами материала диэлектрика, и конструкцией конденсатора.

Параметры $L_{\mathcal{D}}, C_{\mathcal{D}}, R_{\mathcal{D}}, \omega_0$ могут быть определены из представленных на плоскости логарифмических характеристик $|Z_L(j\omega)|$ и $|Z_C(j\omega)|$ на рис. 2. В общем случае на характеристике $|Z_L(j\omega)|$ для дросселя могут быть выделены три основные зоны. В зоне I (рис. 2, а) $Z_L(j\omega)$ имеет индуктивный характер. В зоне II $|Z_L(j\omega)|$ имеет резистивный характер, а в зоне III – емкостной характер. Для конденсатора, в свою очередь (рис. 2, б), в зоне I – емкостной характер, в зоне II – резистивный, а в зоне III – индуктивный. Частотные характеристики $|Z_L(j\omega)|$ и $|Z_C(j\omega)|$ существенным образом зависят от коэффициента затухания $\xi = \frac{1}{2} \beta / \sqrt{km} = \frac{1}{2} \mu'(0) / \mu''(\omega_0)$:

при $\xi < 1$ $|Z_L(j\omega)|$ и $|Z_C(j\omega)|$ имеют выраженный резонанс; при $\xi > 1$ резонанс у $|Z_L(j\omega)|$ и $|Z_C(j\omega)|$ отсутствует (рис. 2). Из выражения $T_0 = \sqrt{m/k} = 1/\omega_0$ следует, что резонансная частота зависит от массы колеблющихся частиц (доменов): чем крупнее домены, тем ниже резонансная частота и больше паразитные элементы.

4. Методика расчета схем замещения конденсаторов и дросселей

Задано:

- номинальные значения индуктивностей дросселей и емкостей конденсаторов L_H, C_H ;
- тип диэлектриков конденсаторов и материала сердечника дросселей.

Расчет элементов электрической схемы замещения $L_{\mathcal{D}}, C_{\mathcal{D}}, R_{\mathcal{D}}$ конденсаторов и дросселей производим либо с использованием графических зависимостей импедансов дросселей и конденсаторов $|Z_L(j\omega)|, |Z_C(j\omega)|$, предоставляемых их производителями или измеряемых разработчиками функциональной аппаратуры, либо с использованием графических частотных зависимостей действительной и мнимой составляющих комплексной магнитной проницаемости $\mu'(j\omega), \mu''(j\omega)$ сердечников дросселей или диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(j\omega), \varepsilon''(j\omega)$ диэлектриков конденсаторов.

При использовании $|Z_L(j\omega)|$ и $|Z_C(j\omega)|$ определяются элементы электрической схемы замещения $L_H, C_{\mathcal{D}}, R_{\mathcal{D}}$, обусловленные материалом сердечника и обмоткой (конструкцией), т. е. проводами дросселя, технологией намотки и т. д. При использовании $|Z_C(j\omega)|$ определяются элементы электрической схемы замещения $C_H, L_{\mathcal{D}}, R_{\mathcal{D}}$ конденсатора, обусловленные материалом диэлектрика и конструкцией, т. е. выводами, металлизацией слоев конденсатора.

При использовании экспериментально измеренных зависимостей $\mu'(j\omega), \mu''(j\omega)$, характеризующих свойства материала (магнитную проницаемость) сердечника дросселя, определяются элементы схемы замещения, обусловленные только материалом сердечника дросселя. При использовании частотных зависимостей диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(j\omega), \varepsilon''(j\omega)$ определяются элементы схемы замещения, обусловленные только материалом диэлектрика конденсатора.

1. При использовании измеренных модулей импедансов конденсаторов и дросселей $|Z(j\omega)|$ определяем резонансную частоту f_0 как:

- частоту, соответствующую экстремуму функции $|Z(j\omega)|$;

- при использовании магнитной проницаемости сердечника дросселя резонансную частоту определяем, как частоту, на которой действительная составляющая магнитной проницаемости $\mu'(j\omega)$ пересекает ось частот (см. Приложение I).

2. Определяем волновое сопротивление (ρ) контуров по формулам:

$$\rho = \omega_0 L \quad \text{— для дросселя;}$$

$$\rho = \frac{1}{\omega_0 C} \quad \text{— для конденсатора.}$$

3. Если используем экспериментально измеренные графические зависимости $|Z(j\omega)|$, то определяем эквивалентные сопротивления $R_{\mathcal{D}}$ как значения $|Z(j\omega)|$ на частоте резонанса $|Z(j\omega)|_{\omega=\omega_0} = R_{\mathcal{D}}$.

4. Коэффициент затухания ξ при использовании графиков $\mu'(j\omega), \mu''(j\omega)$ и $\varepsilon'(j\omega), \varepsilon''(j\omega)$ вычисляем по формулам [24; 25]:

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{\mu'(0)}{\mu''(\omega_0)} \quad \text{— для дросселя;}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon'(0)}{\varepsilon''(\omega_0)} \quad \text{— для конденсатора.}$$

5. Если пользуемся графическими зависимостями $|Z(j\omega)|$, то ξ рассчитываем по формуле (см. Приложение I):

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{\rho}{R_{\mathcal{D}}} \quad \text{— для дросселя;}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{R_{\mathcal{D}}}{\rho} \quad \text{— для конденсатора.}$$

6. Для асимптотического режима, когда $\xi > 1$, амплитудно-частотные логарифмические характеристики импедансов дросселя и конденсатора имеют вид:

f_0 - резонансная частота контура;

f_1 - нижняя частота излома ЛАХ $|Z(j\omega)|$;

f_2 - верхняя частота излома ЛАХ $|Z(j\omega)|$;

7. Определяем $R_{\mathcal{D}}$:

$$R_{\mathcal{D}} = 2\pi f_1 L_H \quad \text{— для дросселя;}$$

$$R_{\mathcal{D}} = \frac{1}{2\pi f_1 C_H} \quad \text{— для конденсатора.}$$

8. Находим $L_{\mathcal{D}}, C_{\mathcal{D}}$:

$$L_{\mathcal{D}} = \frac{\rho}{2\pi f_0} \quad \text{— для конденсаторов;}$$

$$C_{\mathcal{D}} = \frac{1}{2\pi f_0 \rho} \quad \text{— для дросселей.}$$

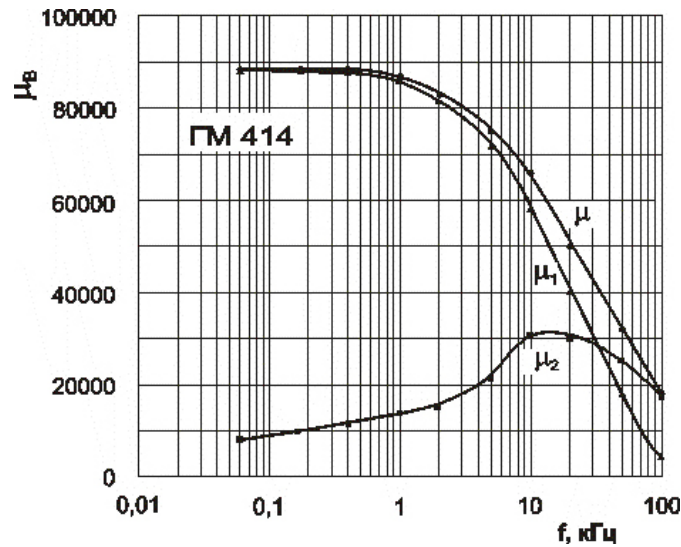


Рис. 3. $\mu'(\omega)$ и $\mu''(\omega)$ сердечника ГМ414
 Fig. 3. $\mu'(\omega)$ and $\mu''(\omega)$ of the GM414 core

5. Расчет элементов эквивалентной электрической схемы замещения дросселя (материал ГМ414, размеры $10 \times 6 \times 7$ мм, число витков $N = 10$)

Произведен с использованием частотных характеристик вещественной и мнимой составляющих комплексной магнитной проницаемости, представленных производителем (Гаммамет) и приведенных на рис. 3:

- номинальное значение индуктивности дросселя $L_H = 10$ мГн;
- материал дросселя ГМ414, 10 витков провода, кольцо;
- заданы графические зависимости действительной и мнимой составляющих магнитной проницаемости $\mu'(j\omega)$, $\mu''(j\omega)$ рис. 3;

По графику $\mu'(\omega)$ при $\mu''(\omega_0) = 0$ находим $f_0 = 240$ кГц.

1.1. С использованием рис. 3 определяем коэффициент затухания:

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{\mu'(0)}{\mu''(\omega_0)} = \frac{1}{2} \frac{90000}{6000} = 7,5,$$

где $\mu'(0)$ – значение вещественной частотной характеристики $\mu'(\omega)$ на нулевой частоте; $\mu''(\omega_0)$ – значение мнимой магнитной проницаемости на частоте $\omega = \omega_0$, где $\mu'(\omega)$ пересекает ось частот.

1.2. Находим волновое сопротивление ρ :

$$\rho = \omega_0 L_H = 15 \text{ кОм.}$$

1.3. По формуле из табл. 1 определяем эквивалентное сопротивление $R_{\mathcal{E}}$:

$$R_{\mathcal{E}} = 2\pi f_1 L_H = 6,28 \left(16 \cdot 10^3\right) \left(10 \cdot 10^{-3}\right) = 1 \text{ кОм.}$$

1.4. Находим частоту излома ЛАХ $|Z_L(j\omega)|$ f_1 (рис. 2, а) по формуле

$$f_1 = \frac{f_0}{2\xi} = \frac{240 \text{ кГц}}{15} = 16 \text{ кГц.}$$

1.5. Частоту излома ЛАХ $|Z_L(j\omega)|$ f_2 рассчитываем по формуле

$$f_2 = f_0 2\xi = 240 \text{ кГц} \cdot 15 = 3,6 \text{ МГц.}$$

1.6. Емкость в эквивалентной схеме замещения определяем по формуле

$$C_{\mathcal{E}} = \frac{1}{2\pi f_0 \rho} = 44 \text{ пФ.}$$

1.7. Произведем расчет модуля сопротивления $|Z_L(j\omega)|$ для схемы (рис. 1, а) с определенными параметрами L_H , $C_{\mathcal{E}}$, $R_{\mathcal{E}}$ с использованием программы FASTMEAN. Результаты расчета $|Z_L(j\omega)|$ приведены на рис. 4.

6. Расчет эквивалентной электрической схемы замещения конденсатора (К10-82 Н-20, $\epsilon = 3000$, $C = 0,1$ мкФ) с использованием частотной характеристики ЛАХ $|Z_C(\omega)|$

2.1. Измеренная характеристика ЛАХ $|Z_C(\omega)|$ приведена на рис. 5. Данная характеристика имеет четко выраженный резонанс на частоте $f_0 = 8,5$ МГц.

2.2. По измеренной экспериментальной характеристике определяем эквивалентное сопротивление $R_{\mathcal{E}}$:

$$R_{\mathcal{E}} = \min \text{ ЛАХ } |Z(\omega)| = 60 \text{ мОм.}$$

2.3. По найденной резонансной частоте f_0 и заданному значению номинальной емкости нахо-

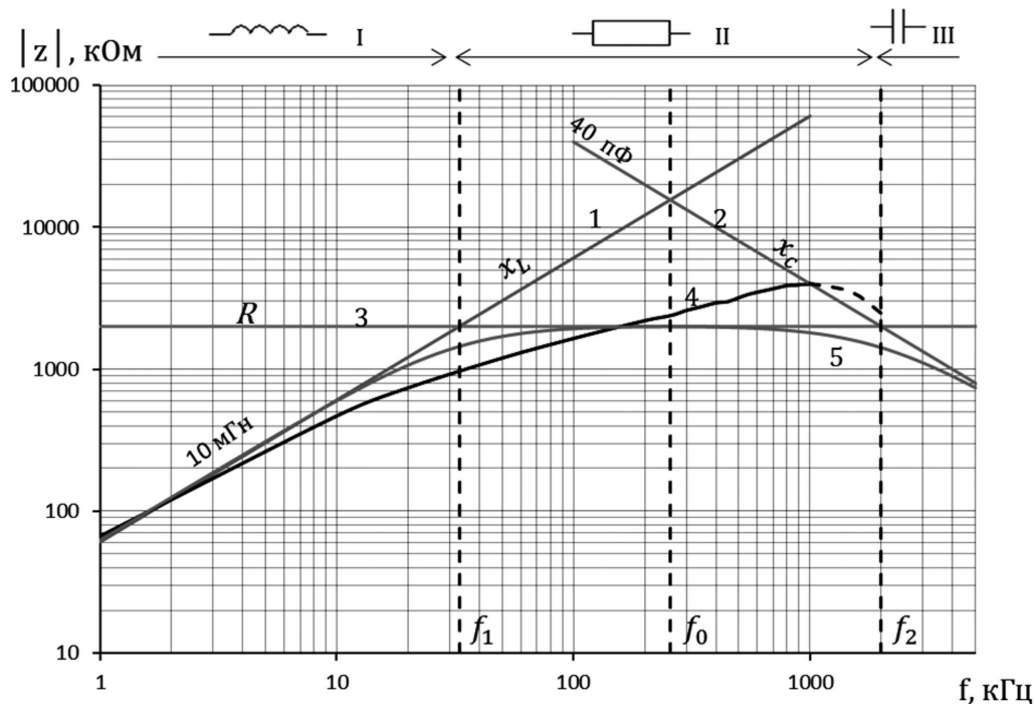


Рис. 4. Модуль сопротивления $|Z_L(j\omega)|$ для сердечника ГМ414, $N = 10$ витков. Кривая 4 – эксперимент, кривая 5 – теоретический расчет
Fig. 4. Resistance module $|Z_L(j\omega)|$ for the GM414 core, $N = 10$ turns. Curve 4 – experiment, curve 5 – theoretical calculation

дим волновое сопротивление ρ двухполюсника (рис. 1, б):

$$\rho = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{6,28 \cdot 8,5 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 0,18 \text{ Ом.}$$

2.4. Рассчитаем значение ξ :

$$\xi = \frac{1 R_{\partial}}{2 \rho} = \frac{1 \cdot 0,060}{2 \cdot 0,18} = 0,17 < 1.$$

2.5. Определим эквивалентную индуктивность L_{∂} двухполюсника (рис. 1, б) по известным волновому сопротивлению ρ и резонансной частоте:

$$L_{\partial} = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{0,18}{6,28 \cdot 8,5 \cdot 10^6} = 3,3 \text{ нГн.}$$

2.6. Произведем расчет модуля сопротивления $|Z_C(j\omega)|$ для схемы (рис. 1, б) с определенными параметрами C_H , L_{∂} , R_{∂} с использованием программы FASTMEAN. Результаты расчета $|Z_C(j\omega)|$ приведены на рис. 5.

7. Экспериментальные исследования

Проведенные теоретические исследования и расчеты частотных характеристик модулей импедансов (комплексных сопротивлений) конденсаторов и дросселей сравнивались с экспериментально измеренными импедансами дросселя с материалом сердечника ГМ414 на приборе Е7-20 в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц. Экспериментальные измерения модуля импеданса кон-

денсатора К10-82п Н20 производились прибором-анализатором импеданса Keysight E4990А в диапазоне частот от 1 МГц до 500 МГц.

Сопоставление полученных теоретических расчетов и экспериментально измеренных характеристик ЛАХ $|Z_C(\omega)|$ для конденсатора К10-82п Н20, показанных на рис. 5, и ЛАХ $|Z_L(\omega)|$ для дросселей с материалом сердечников ГМ414, приведенных на рис. 4, позволяют сделать вывод о совпадении результатов теоретических исследований и экспериментальных измерений.

Из известных авторам литературных источников при разработке поведенческой модели конденсаторов [1–5] не учитываются паразитные индуктивности, обусловленные материалом диэлектрика.

Проведенные авторами экспериментальные исследования диэлектриков из сегнетоэлектриков, имеющих доменную структуру поляризации, позволяют сделать вывод, что магнитная составляющая импеданса диэлектрика обусловлена практически материалом диэлектрика, а не проводниками, которые в изготовленных образцах диэлектриков отсутствовали. Для подтверждения изготавливались диэлектрики абсолютно одинаковой конструкции и размеров на основе сегнетоэлектриков и пироэлектриков с различными материалами, которые имели разную диэлектрическую проницаемость.

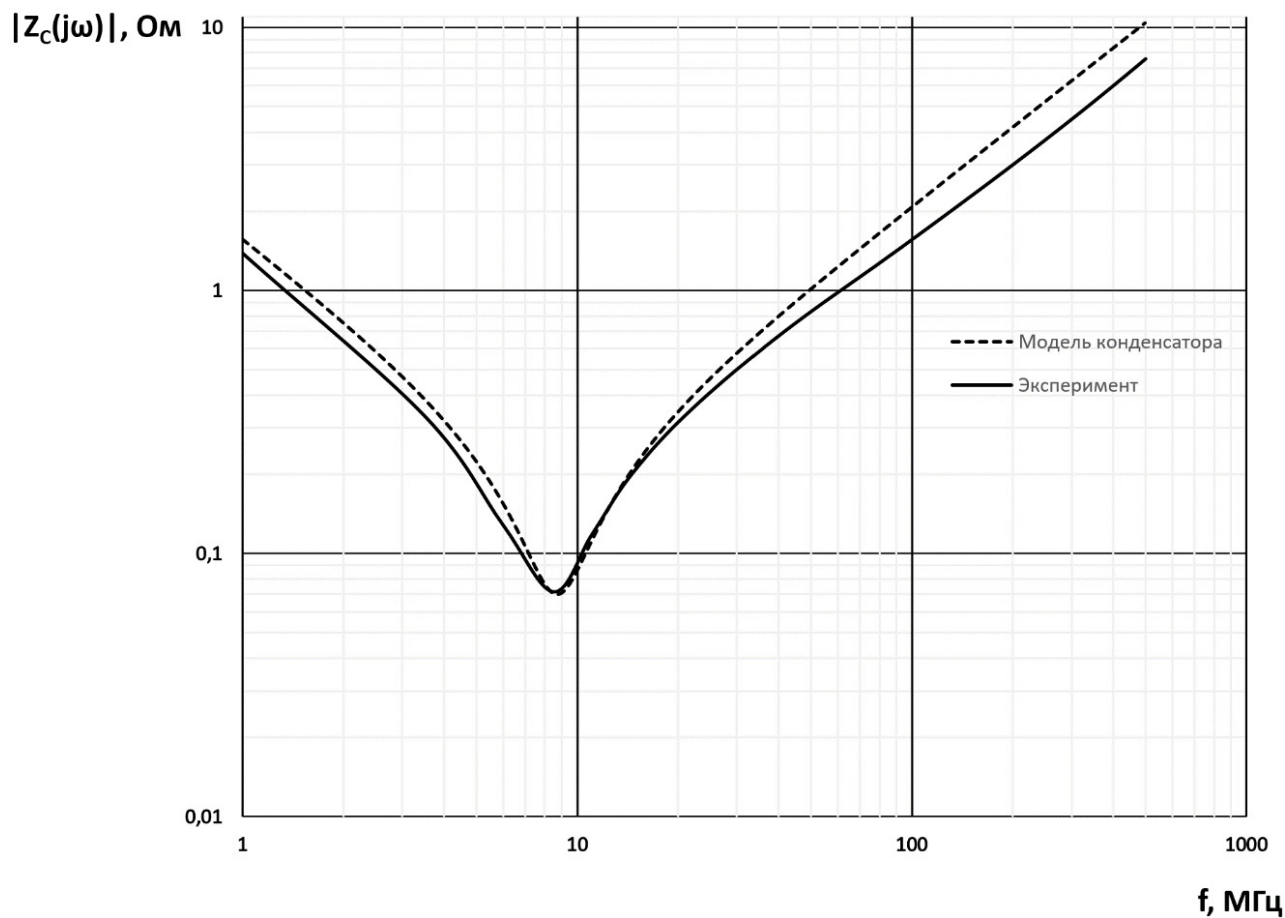


Рис. 5. Модуль сопротивления $|Z_C(j\omega)|$ для конденсатора К10-82н Н20
Fig. 5. Resistance module $|Z_C(j\omega)|$ for capacitor К10-82н Н20

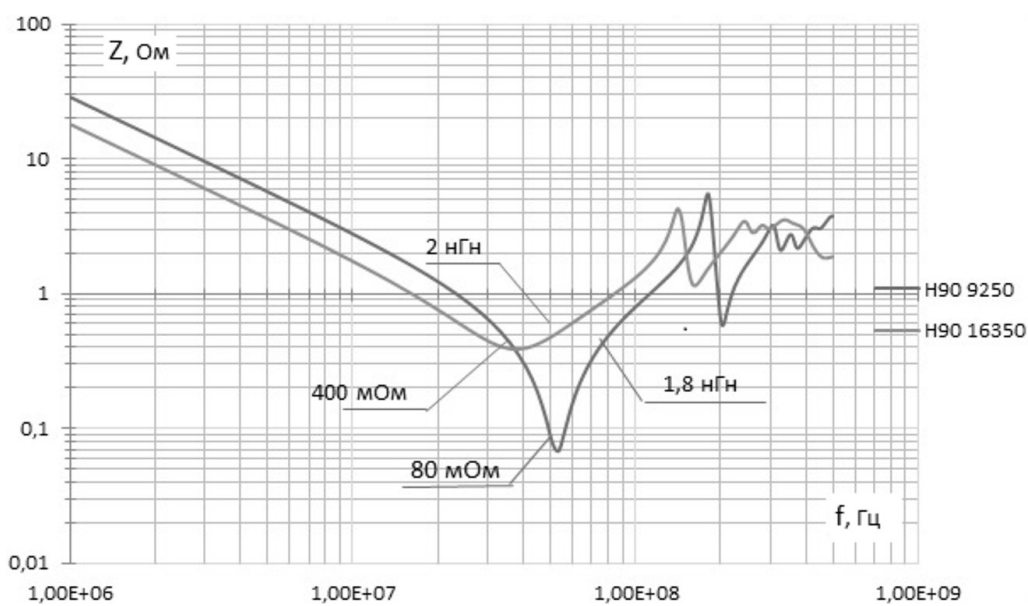


Рис. 6. Модуль комплексного сопротивления диэлектриков группы Н90
Fig. 6. Modulus of complex resistance of dielectrics of the H90 group

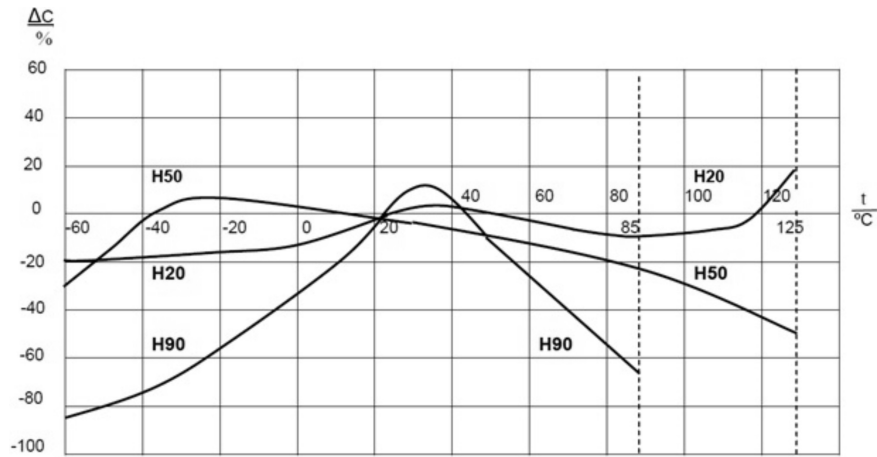


Рис. 7. Характер зависимости емкости конденсаторов групп H20, H50 и H90 от температуры
Fig. 7. The nature of the dependence of the capacitance of capacitors of groups H20, H50 and H90 on temperature

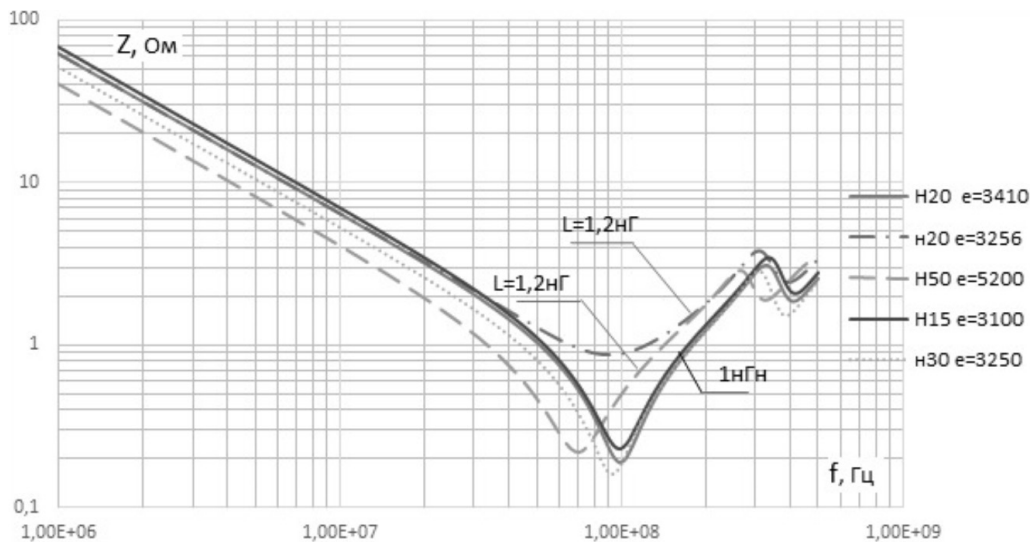


Рис. 8. Модуль сопротивления диэлектриков групп H15, H20, H30, H50
Fig. 8. Modulus of resistance of dielectrics of groups H15, H20, H30, H50

Эти идентичные по размеру и конструкции диэлектрики, но с разным материалом имели различную паразитную индуктивность. Это должно еще раз подтверждать, что паразитной индуктивностью обладают динамические процессы поляризации материала диэлектриков.

8. Экспериментальное исследование частотных характеристик сегнетоэлектрика

В качестве образцов выбраны керамические диэлектрики различных групп ТСЕ и ТКЕ: H15, H20, H30, H50, H90 и МПО. Изделия выполнены в форме дисков (диаметр – 11,8 мм, толщина – 1,4 мм), по торцам которых нанесена тонкая металлизация из серебра.

На рис. 6 представлены графики зависимостей модуля комплексного сопротивления группы H90

с диэлектрической проницаемостью 16350 и 9250. Данная группа характеризуется высокими значениями диэлектрической проницаемости, однако имеет низкие значения стабильности электрических параметров. Так, при изменении рабочей температуры до 85 °С диэлектрическая проницаемость может уменьшиться до 90 % от номинальной (рис. 7). На представленных графиках (рис. 5) отчетливо видно, что модуль $|Z_C(j\omega)|$ данных образцов при условии отсутствия внутренних проводников имеет резонансный характер. Это приводит к заключению, что индуктивной составляющей сопротивления обладает материал диэлектрика с доменной структурой.

С ростом частоты модуль сопротивления убывает до определенного значения, а затем начинает возрастать. Данный характер присущ последовательному колебательному контуру. На графике для диэлектрика с $\epsilon = 9250$ можно выделить участок

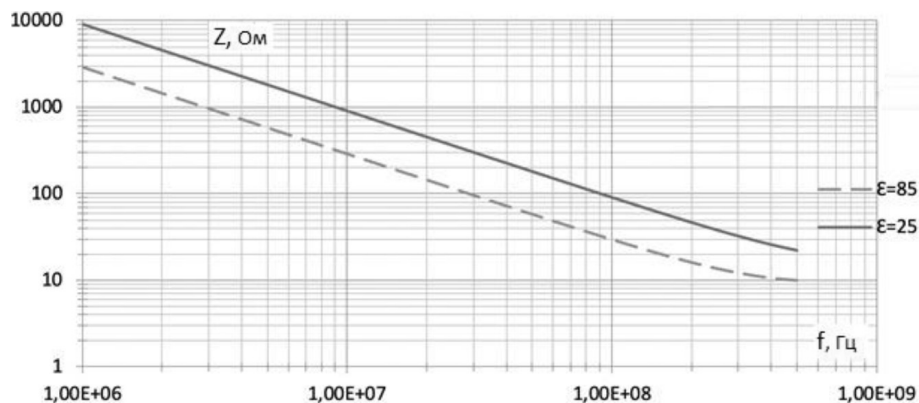


Рис. 9. Модуль сопротивления для материалов группы МПО

Рис. 9. Modulus of resistance for materials of group МPO

емкостного сопротивления (до частоты 50 МГц), резистивного (на частоте около 50 МГц, $R_{\text{Э}} = 80$ мОм) и индуктивного (после 50 МГц, $L_{\text{Э}} = 1,8$ нГн).

Для диэлектрика с $\epsilon = 16350$ участок емкостного сопротивления доходит до частоты 35 МГц, на частоте 35 МГц сопротивление диэлектрика имеет резистивный характер $R_{\text{Э}} = 380$ мОм, после частоты 35 МГц – индуктивный характер.

На рис. 8 представлены графики модуля сопротивления керамических диэлектриков групп Н15, Н20, Н30, Н50. Диэлектрики данных групп за счет определенных добавок отличаются более высокой стабильностью электрических параметров, однако имеют более низкую диэлектрическую проницаемость по сравнению с группой Н90. Так, для группы Н50 емкость может уменьшаться до 50 % от номинальной при температуре 125 °С. Диэлектрики групп Н90–Н15 обладают большими потерями, т. е. большим значением тангенса угла диэлектрических потерь (до $350 \cdot 10^{-4}$) и более низкими значениями сопротивления изоляции (до 3000 МОм).

Из вышеприведенных зависимостей отчетливо видно, что в диапазоне частот от 70 МГц и примерно до 100 МГц модуль сопротивления диэлектриков имеет резонансный характер. Были измерены эквивалентные индуктивности данных образцов. Полученные результаты показали, что величины эквивалентных индуктивностей групп Н15, Н20, Н30, Н50 меньше (примерно в два раза), чем у группы Н90, а резонансные частоты выше, чем у диэлектрика Н90, и находятся в диапазоне 70–100 МГц. Поскольку данные образцы диэлектриков не имеют внутренних проводников, то из этого можно сделать вывод, что величина эквивалентной индуктивности данных образцов зависит от диэлектрической проницаемости, то есть от характеристик самого материала, а не от проводников, которых в данных образцах нет.

9. Экспериментальные исследования пироэлектриков

На рис. 9 представлена зависимость модуля сопротивления для керамических диэлектриков группы МПО. Данная группа характеризуется высокими значениями стабильности параметров, но низкой диэлектрической проницаемостью (примерно 25–85). Диэлектрики, относящиеся к данной группе ТКЕ, имеют низкие значения тангенса угла диэлектрических потерь (не более 0,0015) и высокие значения сопротивления изоляции (10000 МОм).

На рис. 9 отчетливо видно отсутствие резонансного характера $|Z_C(j\omega)|$ данных образцов вплоть до 500 МГц (предельный частотный диапазон измерительного прибора). Это обусловлено тем, что данная группа ТСЕ не относится к классу сегнетоэлектриков (не обладает доменной структурой), в силу чего в предлагаемом образце отсутствует эффект доменной поляризации (смещения доменной стенки), или, иными словами, колебательный процесс доменных структур. Следовательно, отсутствует низкочастотный резонанс. Резонансный характер, связанный с ионной поляризацией, должен наблюдаться на гораздо более высоких частотах.

Заключение

При проектировании радиоэлектронной аппаратуры необходимо использовать схемы замещения конденсаторов и дросселей, являющихся неотъемлемой частью РЭА. При синтезе схем замещения нужно учитывать все факторы, влияющие на комплексное сопротивление конденсаторов и дросселей $Z(j\omega)$. Наиболее важными факторами являются конструкция конденсаторов, дросселей и частотные свойства диэлектриков и сердечников. При синтезе схем замещения конденсаторов, дросселей по частотным характеристикам модуля

и фазы $Z(j\omega)$ не исследуются динамические процессы, происходящие в диэлектрике конденсатора и сердечнике дросселя, не устанавливаются связи схем замещения с составом и свойствами диэлектрика и сердечника. Хотя знание подобных связей позволит более обоснованно подходить к выбору диэлектрика конденсатора и сердечника дросселя и вопросам оптимизации конструкции изделия в целом.

С использованием феноменологических уравнений, описывающих динамические процессы поляризации диэлектриков конденсаторов и намагничивания сердечников дросселей при воздействии на них высокочастотного электромагнитного поля, получены модели конденсатора с учетом нелинейных частотно-зависимых характеристик диэлектрической проницаемости $\epsilon(j\omega)$ и модели дросселя с учетом нелинейных частотно-зависимых характеристик магнитной проницаемости $\mu(j\omega)$ и их эквивалентные электрические схемы замещения. Установлена связь элементов эквивалентных электрических схем замещения конденсаторов и дросселей с электрофизическими характеристиками материала диэлектрика конденсатора и сердечника дросселя, а также связь элементов эквивалентной электрической схемы замещения с $\epsilon(j\omega)$ и $\mu(j\omega)$.

Разработана методика расчета эквивалентной электрической схемы замещения конденсаторов и дросселей с учетом нелинейных частотно-зависимых свойств материалов (характеристик $\epsilon(j\omega)$, $\mu(j\omega)$) диэлектриков и сердечников.

Показано, что при использовании конденсатора с сегнетоэлектриками, имеющими доменную структуру, магнитная составляющая импеданса обусловлена практически только материалом диэлектрика, а не проводниками. Частота резонанса импеданса – 35–50 МГц, индуктивность – 2 нГн. При использовании в конденсаторе пироэлектриков, имеющих ионный механизм поляризации, частота резонанса импеданса на порядки выше, а индуктивность – на порядки меньше.

Результаты расчета и измерений импеданса дросселя с сердечником из нанокристаллического сплава на основе железа ГМ414 выявили следующее: суммарная межвитковая емкость дросселя составляет 5 пФ, а емкость, обусловленная материалом сердечника – 40 пФ, т. е. превышает межвитковую емкость в восемь раз.

Полученные результаты могут быть использованы в инженерной практике при проектировании как перспективных конденсаторов и дросселей, так и радиоэлектронной аппаратуры на их основе.

Список литературы

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
2. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование. Киев: МК-Пресс, 2005. 279 с.
3. Бейкер Б. Что нужно знать цифровому разработчику об аналоговой электронике. М.: Додэка XXI век, 2010. 360 с.
4. Дмитриков В.Ф. Ростовцев А.Г. Динамические потери в ключевых транзисторных генераторах // Техника средств связи. 1981. Вып. 6.
5. Кобелянский А.Е. Исследование и разработка высокоэффективных импульсных преобразователей напряжения с ШИМ и систем электропитания на их основе: дис. ... канд. тех. наук. 2010. 219 с.
6. Analytical wideband model of a common-mode choke / M. Kovacic [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27. № 7. P. 3173–3185. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2182060>.
7. Kotny J.L., Margueron X., Idir N. High-frequency model of the coupled inductors used in EMI filters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27. № 6. P. 2805–2812. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2175452>.
8. A high frequency equivalent circuit and parameter extraction procedure for common mode choke in the EMI filter / T. Wenhua [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28. № 3. P. 1157–1166. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2209206>.
9. Measurement method of the complex magnetic permeability of ferrites in high frequency / C. Cuellar [et al.] // 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. 2012. P. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2012.6229697>.
10. Huang R., Zhang D. Using a single toroidal sample to determine the intrinsic complex permeability and permittivity of Mn-Zn ferrites // IEEE Transactions on Magnetics. 2007. Vol. 43. № 10. P. 3807–3815. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.903294>.
11. Shenhui J., Quanxing J. An alternative method to determine the initial permeability of ferrite core using network analyzer // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2005. Vol. 47. № 3. P. 651–657. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.853169>.
12. Tsutaoka T. Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials // Journal of Applied Physics. 2003. Vol. 93. № 5. P. 2789–2796. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1542651>.
13. Massarini A., Kazimierczuk M.K. Self-capacitance of inductors // IEEE Transactions on Power Electronics. 1997. Vol. 12. № 4. P. 671–676. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.602562>.
14. Wang S., Zeyuan L., Xing Y. Extraction of parasitic capacitance for toroidal ferrite core inductor // 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. 2010. P. 451–456. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2010.5517152>.

15. Cuellar C., Idir N., Benabou A. High frequency behavioral ring core inductor model // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31. № 5. P. 3763–3772. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2460374>.
16. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. К теории дискретности магнитной проницаемости ферромагнитных тел. М.: Наука, 1969. 512 с.
17. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. Екатеринбург: Изд-во Уральского ин-та, 2002. 384 с.
18. Филиппов Б.Н., Жаков С.В. Теории динамических свойств ферромагнитных монокристалльных пластин, обладающих доменной структурой // *Физика металлов и металловедение*. 1975. Т. 39. № 4. С. 705–717.
19. Каталог Soft ferrites and accessories TDK EPCOS.
20. Brown J. Understanding how ferrites can prevent and eliminate RF interference to audio systems. URL: <http://audiosystemsgroup.com/SAC0305Ferrites.pdf>.
21. Cullity В., Graham С. Introduction to Magnetic Materials; 2nd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2009.
22. Морозов А.И. Физика твердого тела. Электроны в кристалле. Металлы. Полупроводники. Диэлектрики. Магнетики. Сверхпроводники. М.: МГИРЭИ, 2008. 192 с.
23. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов / В.А. Головин [и др.]. М.: Техносфера, 2016. 272 с.
24. Синтез эквивалентных частотных схем замещения дросселя / В.Ф. Дмитриков [и др.] // *Практическая силовая электроника*. 2017. Т. 66. № 2. С. 5–11.
25. Synthesis of equivalent circuits for chokes and capacitors in a wide range of frequencies taking into account dynamic processes in dielectric and magnetic materials / V.F. Dmitrikov [et al.] // 2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). 2019. P. 532–540. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM.2019.8823489>.
26. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф. Основы теории цепей. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 592 с.
27. Фрелих Г. Теория диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери. М.: Издательство иностранной литературы, 1960. 251 с.

References

1. Meleshin V.I. *Transistor Converter Technology*. Moscow: Tehnosfera, 2005, 632 p. (In Russ.)
2. Braun M. *Power Supplies. Calculation and Design*. Kiev: MK-Press, 2005, 279 p. (In Russ.)
3. Bejker B. *What a Digital Developer Needs to Know about Analog Electronics*. Moscow: Dodeka XXI vek, 2010, 360 p. (In Russ.)
4. Dmitrikov V.F., Rostovtsev A.G. Dynamic loss in key transistor generators. *Tehnika sredstv svyazi*, 1981, no. 6. (In Russ.)
5. Kobeljanskij A.E. *Research and development of high-efficiency switching voltage converters with PWM and power supply systems based on them*: PhD thesis, 2010, 219 p. (In Russ.)
6. Kovacic M. et al. Analytical wideband model of a common-mode choke. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 7, pp. 3173–3185. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2182060>.
7. Kotny J.L., Margueron X., Idir N. High-frequency model of the coupled inductors used in EMI filters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, vol. 27, no. 6, pp. 2805–2812. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2175452>.
8. Wenhua T. et al. A high frequency equivalent circuit and parameter extraction procedure for common mode choke in the EMI filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, no. 3, pp. 1157–1166. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2209206>.
9. Cuellar C. et al. Measurement method of the complex magnetic permeability of ferrites in high frequency. *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2012, pp. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2012.6229697>.
10. Huang R., Zhang D. Using a single toroidal sample to determine the intrinsic complex permeability and permittivity of Mn-Zn ferrites. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, vol. 43, no. 10, pp. 3807–3815. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.903294>.
11. Shenhui J., Quanxing J. An alternative method to determine the initial permeability of ferrite core using network analyzer. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005, vol. 47, no. 3, pp. 651–657. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2005.853169>.
12. Tsutaoka T. Frequency dispersion of complex permeability in Mn-Zn and Ni-Zn spinel ferrites and their composite materials. *Journal of Applied Physics*, 2003, vol. 93, no. 5, pp. 2789–2796. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1542651>.
13. Massarini A., Kazimierczuk M.K. Self-capacitance of inductors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1997, vol. 12, no. 4, pp. 671–676. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.602562>.
14. Wang S., Zeyuan L., Xing Y. Extraction of parasitic capacitance for toroidal ferrite core inductor. *2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2010, pp. 451–456. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2010.5517152>.
15. Cuellar C., Idir N., Benabou A. High frequency behavioral ring core inductor model. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, no. 5, pp. 3763–3772. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2460374>.
16. Landau L.D., Livshits E.M. *On the Theory of Discreteness of Magnetic Permeability of Ferromagnetic Bodies*. Moscow: Nauka, 1969, 512 p. (In Russ.)
17. Starodubtsev Ju.N., Belozеров V.Ja. *Magnetic Properties of Amorphous and Nanocrystalline Alloys*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo in-ta, 2002, 384 p. (In Russ.)
18. Filippov B.N., Zhakov S.V. Theories of dynamic properties of ferromagnetic single crystal wafers with a domain structure. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1975, vol. 39, no. 4, pp. 705–717. (In Russ.)
19. Catalog «Soft ferrites and accessories» TDK EPCOS.

20. Brown J. *Understanding how ferrites can prevent and eliminate RF interference to audio systems*. URL: <http://audiosystemsgroup.com/SAC0305Ferrites.pdf>.
21. Cullity B., Graham C. *Introduction to Magnetic Materials*; 2nd ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2009.
22. Morozov A.I. *Solid State Physics. Electrons in a Crystal*. Metals Semiconductors. Dielectrics. Magnets. Superconductors. Moscow: MGIREiA, 2008, 192 p. (In Russ.)
23. Golovin V.A. et al. *Physical Foundations, Research Methods and Practical Application of Piezomaterials*. Moscow: Tehnosfera, 2016, 272 p. (In Russ.)
24. Dmitrikov V.F. et al. Synthesis of equivalent frequency choke equivalent circuits. *Prakticheskaja silovaja elektronika*, 2017, vol. 66, no. 2, pp. 5–11. (In Russ.)
25. Dmitrikov V.F. et al. Synthesis of equivalent circuits for chokes and capacitors in a wide range of frequencies taking into account dynamic processes in dielectric and magnetic materials. *2019 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, 2019, pp. 532–540. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM.2019.8823489>.
26. Bakalov V.P., Dmitrikov V.F. *Theory of Chain Theory*. Moscow: Gorjachaja linija – Telekom, 2018, 592 p. (In Russ.)
27. Frel'ih G. *Theory of Dielectrics. Dielectric Constant and Dielectric Loss*. Moscow: Izdatel'stvo inostranno'j literatury, 1960, 251 p. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2020, vol. 23, no. 2, pp. 55–69

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.2.55-69

Received 23 April 2020

Accepted 28 May 2020

Development of high frequency equivalent electric circuits for capacitors and chokes taking into account frequency-dependent dielectric and magnetic permittivity properties of dielectric and magnetic materials

*Vladimir F. Dmitrikov¹, Alexander Yu. Petrochenko²,
Lev E. Frid³, Artyom E. Belyaev¹, Zinaida V. Zaitseva¹*

¹ The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications

22, b. 1, Bol'shevikov Avenue,
Saint Petersburg, 193232, Russia

² JSC «Concern «Aurora SPA»»

15, Karbysheva Street,
Saint Petersburg, 194021, Russia

³ LLC «North West Laboratory»

5A, Varshavskaya Street,
Saint Petersburg, 196128, Russia

Abstract – Switching of power semiconductor devices in secondary power supplies is the main source of electromagnetic interference. The level of conductive interference must be lowered to meet standards of electromagnetic compatibility. This lowering can be achieved by various methods, including radio interference filters, that are built mainly from inductor coils (chokes) and capacitors. Chokes and capacitors are key elements to design radio interference filters and knowledge of their accurate high-frequency models is required for a wide range of frequencies up to 100 MHz and higher. The article is devoted to development of high-frequency models of capacitors and chokes based on equivalent electric circuits, which parameters are expressed either through electrical-physical values, or through frequency-dependent dielectric permittivity of the dielectric material and magnetic permittivity of the core. Results of modelling are confirmed by impedance measurements of a capacitor with ferroelectric and pyroelectric material used as capacitor's dielectric and a choke with a core made of nanocrystalline alloy based on GM414 iron. An example of radio interference filter for attenuation of balanced and unbalanced conductive interference is used to consider the negative impact of «spray inductance» of capacitors and «spray capacitance» of chokes.

Keywords – power converter, electromagnetic compatibility, equivalent electric circuit, dielectric permittivity, magnetic permittivity, radio interference filter.

Информация об авторах

Дмитриков Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры теории электрических цепей и связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича. Заслуженный деятель науки РФ, член бюро совета «Научные проблемы систем электропитания» при отделении РАН «Элек-

Information about the Authors

Vladimir F. Dmitrikov, Doctor of Engineering, professor of the Department of Theory of Electrical Circuits and Communications, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia. Honoured worker of science of the Russian Federation, Member of Bureau of the Council «Scientific Problems of Power Supply Systems» at the «Electrophys-

трофизика, энергетика, электротехника», г. Санкт-Петербург, Россия.

Область научных интересов: энергетически высокоэффективные ключевые режимы генерирования и усиления электрических колебаний и информационных сигналов, теория линейных и нелинейных электрических цепей, радиосвязь, радионавигация, преобразовательная техника.

E-mail: dmitrikov_vf@mail.ru

Петроченко Александр Юрьевич, аспирант АО «Концерн «НПО Аврора»».

Область научных интересов: силовая электроника, преобразовательная техника, теория ключевых режимов преобразований электрических колебаний, г. Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: petrochenko_a@bk.ru

Фрид Лев Ефимович, технический директор ООО «Северо-Западная Лаборатория», г. Санкт-Петербург, Россия.

Область научных интересов: силовая электроника, преобразовательная техника, теория ключевых режимов преобразований электрических колебаний.

E-mail: l.frid@ferrite.ru

Беляев Артем Евгеньевич, аспирант кафедры теории электрических цепей и связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия.

Область научных интересов: силовая электроника, преобразовательная техника, теория ключевых режимов преобразований электрических колебаний.

E-mail: artiom.belyaev2012@yandex.ru

Зайцева Зинаида Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры теории электрических цепей и связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия.

Область научных интересов: теория электрических цепей, синтез электрических фильтров, машинные методы анализа электрических цепей, силовая электроника, устройства преобразовательной техники.

E-mail: zaitch13@gmail.com

ics, Power Industry, Electrical Engineering» Department of RAS, Saint Petersburg, Russia.

Research interests: highly efficient switching modes of generation and amplification of electric oscillations, theory of linear and non-linear electric circuits, radio communication, radio navigation, converters.

E-mail: dmitrikov_vf@mail.ru

Alexander Yu. Petrochenko, postgraduate student, JSC «Concern «Aurora SPA»», Saint Petersburg, Russia.

Research interests: distributed power supply systems, converter equipment, theory of switched-mode conversion of electrical oscillation.

E-mail: petrochenko_a@bk.ru

Lev E. Frid, technical director of LLC «North West Laboratory», Saint Petersburg, Russia.

Research interests: distributed power supply systems, converter equipment, theory of switched-mode conversion of electrical oscillation.

E-mail: l.frid@ferrite.ru

Artyom E. Belyaev, postgraduate student of Department of Theory of Electric Circuits and Communication, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia.

Research interests: power electronics, converters, theory of switched modes of electric oscillation conversion.

E-mail: artiom.belyaev2012@yandex.ru

Zinaida V. Zaitseva, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Theory of Electrical Circuits and Communications, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, Saint Petersburg, Russia.

Research interests: the theory of electrical circuits, filter synthesis, computer methods for circuit analysis and design, distributed power supply systems, power electronics.

E-mail: zaitch13@gmail.com