

# ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ДРОССЕЛЯ НА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СЕРДЕЧНИКЕ С БОЛЬШОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

В. Ф. Дмитриков, Д. В. Шушпанов, Э. А. Фоченков

*На основе тороидального сердечника, навитого из тонкой (18 мкм) нанокристаллической ленты, с разным количеством витков обмотки реализована эквивалентная схема замещения дросселя в широком диапазоне частот (0 Гц–500 МГц). Для синтеза были измерены частотные характеристики сопротивления дросселя и учтены физические процессы, протекающие в магнетике.*

*An equivalent replacement circuit for inductor coil has been synthesized in a wide frequency range (0 Hz–500 MHz) based on a toroidal core wound from a thin (18 microns) nanocrystalline tape with a different number of winding turns. For synthesis, the frequency characteristics of the resistance of inductor coil were measured and the physical processes occurring in the magnetic were taken into account.*

**Введение.** Наиболее сложными в расчете и производстве реактивных элементов являются дроссели. Они являются частью сглаживающего фильтра и фильтра радиопомех (ФРП) в импульсных источниках электропитания. Разработчикам РЭА требуются частотные характеристики комплексных сопротивлений дросселей, а также их точные высокочастотные эквивалентные структурно-параметрические схемы замещения (поведенческие модели) в диапазоне частот до 100 МГц и выше для программ схемотехнического моделирования.

Современное развитие измерительной техники позволило измерять комплексное сопротивление дросселя в широкой области частот (больше 10 МГц). Но данные измерения комплексного сопротивления дросселя стали проводить сравнительно недавно [2, 3]. Измерение частотных характеристик комплексного сопротивления реального дросселя в широком диапазоне частот (до 500 МГц) [4–7] позволило увидеть, что реальный дроссель в широкой области частот представляет собой сложное

устройство, и использование «старых» НЧ схем замещения не всегда корректно при проектировании РЭА.

В [1] была построена схема замещения дросселя с тороидальным ферритовым сердечником, т.к. именно этот материал наиболее часто используется в силовой электронике. Данная схема замещения была построена с учетом физических эффектов (влияние сопротивления провода и материала сердечника, взаимное влияние провода и материала сердечника). Требовалось объяснение, почему частотные характеристики (модуль и фаза) комплексного сопротивления так ведут себя в широкой полосе частот (до 500 МГц). Эта схема отличается от схемы замещения, предложенной в [2, 3], тем, что: является более высокочастотной и при её расчете учитывалась фаза комплексного сопротивления дросселя, что позволило лучше объяснить физические процессы, протекающие в дросселе.

Аморфные сплавы производятся по технологии сверхбыстрого охлаждения расплава со скоростью охлаждения более миллиона градусов Цельсия в секунду. За счет высокой скорости охлаждения в металле не успевают сформироваться кристаллическая решётка, и он застывает в виде ленты с аморфной внутренней структурой, характерной стеклу и жидкостям. Аморфная структура сплава обеспечивает хорошую подвижность магнитных доменов, не связанных кристаллической решеткой, что определяет отличные магнитомягкие свойства.

Структура аморфных сплавов имеет ближний порядок, т.е. состоит из упорядоченных микрогруппировок атомов. Другим представителем нового класса метастабильных быстро охлаждённых сплавов и активным соперником аморфных сплавов являются нанокристаллические сплавы. «Материнской» основой нанокристаллического сплава является исходный аморфный сплав определенного состава (Fe-Cu-Nb-Si-B). Методом получения наноструктуры является прецизионный отжиг – регулируемая кристаллизация из исходного аморфного состояния. Структура нанокристаллического сплава представляет собой двухфазную систему, одной из фаз которой являются нанокристаллы, а другой – остаточная аморфная матрица. Свойства наносплава зависят от состава, размера и количества нанокристаллов, а также их соотношения с аморфной фазой. По своим свойствам нанокристаллический сплав превосходит аморфный сплав на основе кобальта при меньшей цене. Имея высокую индукцию

насыщения (1,2 Тл против 0,6 Тл), высокую температуру Кюри (560°С против 235°С), обеспечивая высокую рабочую температуру (180°С против 100°С), а также хорошую температурную стабильность в широком диапазоне рабочих температур от -60°С до +155°С (изменение проницаемости не более 15%), новый нанокристаллический материал на основе железа представляет большой интерес для различных применений. Одним из самых массовых применений этих материалов являются синфазные дроссели, широко используемые в фильтрах радиопомех и импульсных источниках питания различного назначения. В данном применении высокая проницаемость материала позволяет резко сократить длину провода, собственные характеристики которого на высоких частотах имеют важное значение, что будет показано в данной статье.

В [2, 3] была предложена схема замещения для подобного нанокристаллического дросселя, но она, как и в случае с ферритовым сердечником, имеет те же недостатки: не является достаточно высокочастотной (до 100 МГц) и при её расчете не рассматривалась фаза комплексного сопротивления дросселя. Кроме того, в схеме замещения дросселя, используемой в [2, 3], используется длинная линия, параметры которой неясно как выбирать, и предложенную схему замещения достаточно сложно модернизировать для создания схемы замещения для двух- или трехобмоточного дросселя или трансформатора – приходится с нуля создавать новую схему замещения [8].

В данной статье рассматривается построение схемы замещения дросселя на основе тороидального сердечника, навитого из тонкой (18 мкм) нанокристаллической ленты. Подобные магнитные материалы имеют принципиальные отличия от традиционных ферритов, пермаллоев, магнитодиэлектриков. Синтезируется схема замещения дросселя с учетом физических эффектов (влияние сопротивления провода и материала сердечника, взаимное влияние провода и материала сердечника) в широкой полосе частот (до 1 ГГц).

Как следует из [1] и рис. 1, изменение количества витков (от одного до семи) в дросселе на феррите приводит как к изменению модуля, так и к изменению фазы комплексного сопротивления дросселя. Это обуславливает схему замещения дросселя со сложной зависимостью от количества витков. Это связано с тем [1], что сердечник дросселя после

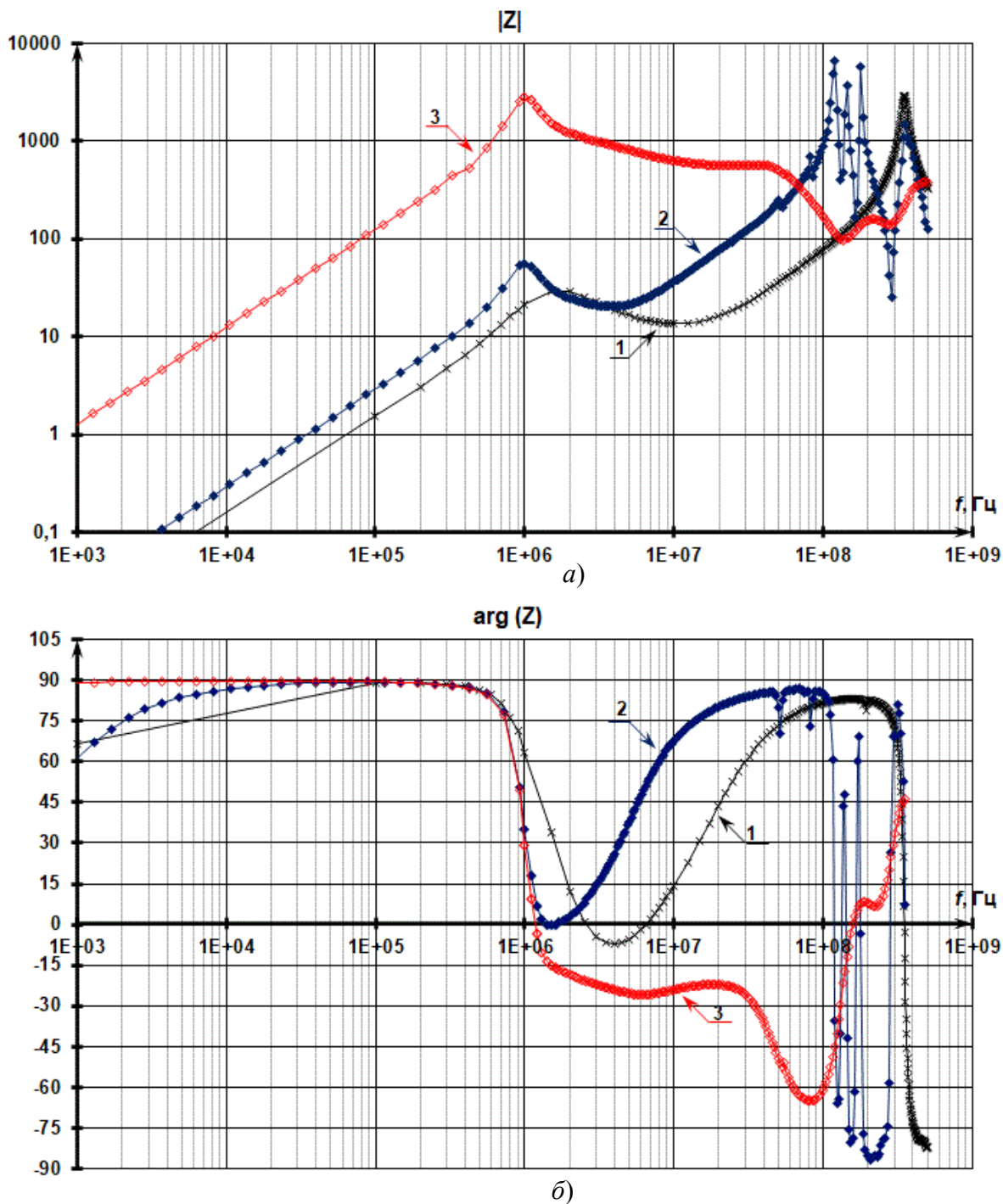


Рис. 1. Измеренные модуль (а) и фаза (б) комплексного сопротивления дросселя (сердечник N87) с различным количеством витков и длиной провода:  
 1) 1 виток (15 см), 2) 1 виток (60 см), 3) 7 витков (60 см)

частот выше единиц МГц уже не представляет собой магнитный материал, поскольку комплексная магнитная проницаемость (вещественная и мнимая составляющие) резко уменьшаются, а вещественная составляющая становится отрицательной. Кроме того, надо учитывать высокочастотный (сотни МГц) всплеск комплексного сопротивления дросселя (рис. 1), возникающий из-за того, что начинает проявляться эффект длинных линий,

т.к. геометрические размеры провода становятся соизмеримы с длиной волны электромагнитного колебания на частотах в сотни МГц [1].

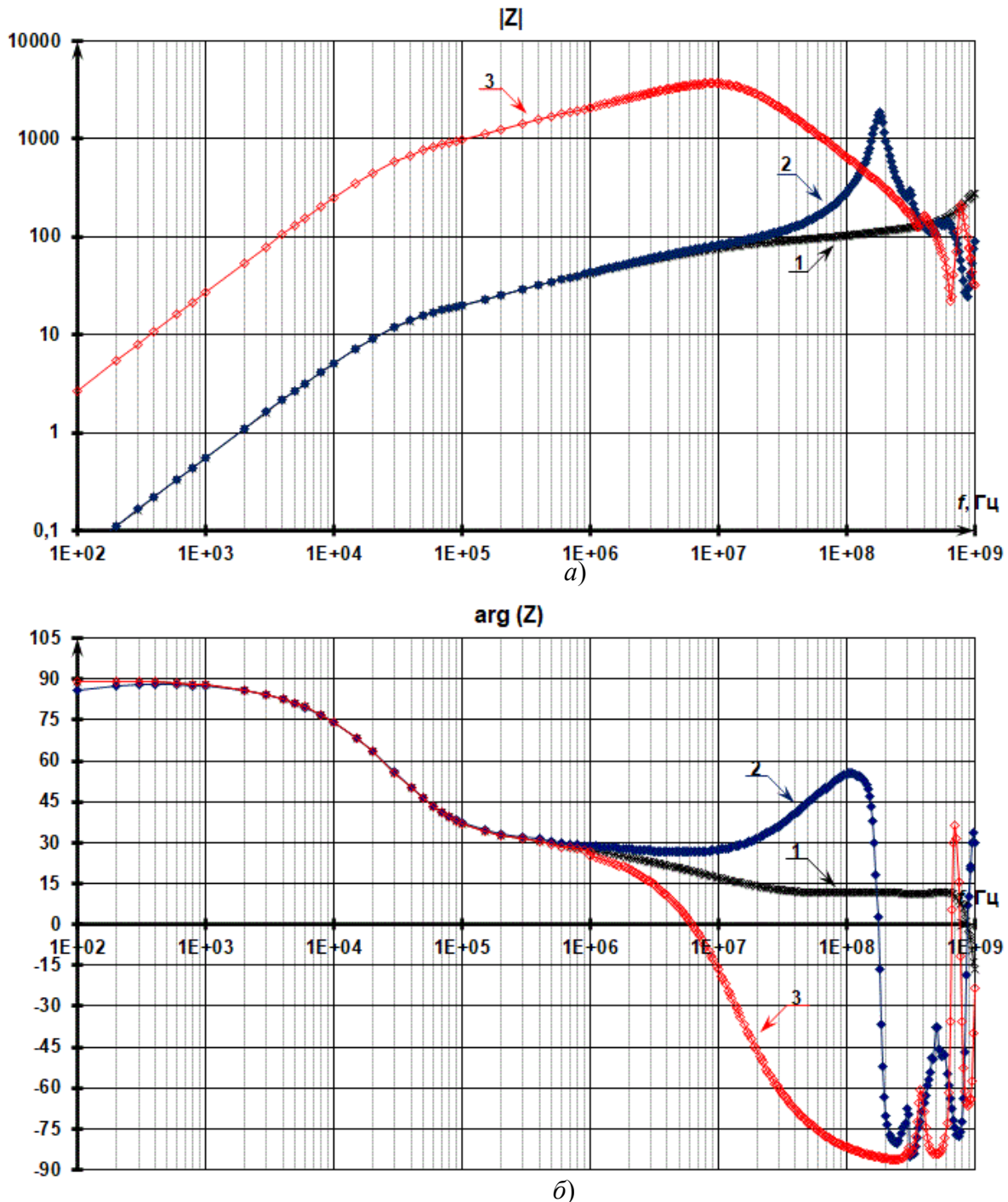


Рис. 2. Измеренные модуль (а) и фаза (б) комплексного сопротивления дросселя (сердечник MSFN-25S-TH) с различным количеством витков и длиной провода:  
 1) 1 виток (6 см), 2) 1 виток (38 см), 3) 7 витков (38 см)

**Комплексное сопротивление дросселя на сердечнике из нанокристаллического сплава.** В ПАО «Мстатор» (г. Боровичи) были проведены измерения модуля и фазы комплексного сопротивления дросселей (рис. 2), намотанных на нанокристаллическом кольцевом сердечнике MSFN-25S-TH с разным количеством витков и длиной провода

(рис. 3). Измерения проводились на анализаторах импеданса Keysight E4982A (в диапазоне частот от 1 МГц до 3 ГГц) и Keysight E4980AL (в диапазоне частот 100 Гц до 1 МГц). Кольцевой сердечник, навитый из нанокристаллической ленты АМАГ 200С на основе железа, имел размеры 25×16×10 мм. Для защиты магнитного материала от давления провода и для изоляции использовался пластмассовый контейнер. Размеры в контейнере 27,7×13,8×12,5 мм. Провод был разной длины (6 см и 38 см) и  $\varnothing = 1,5$  мм.

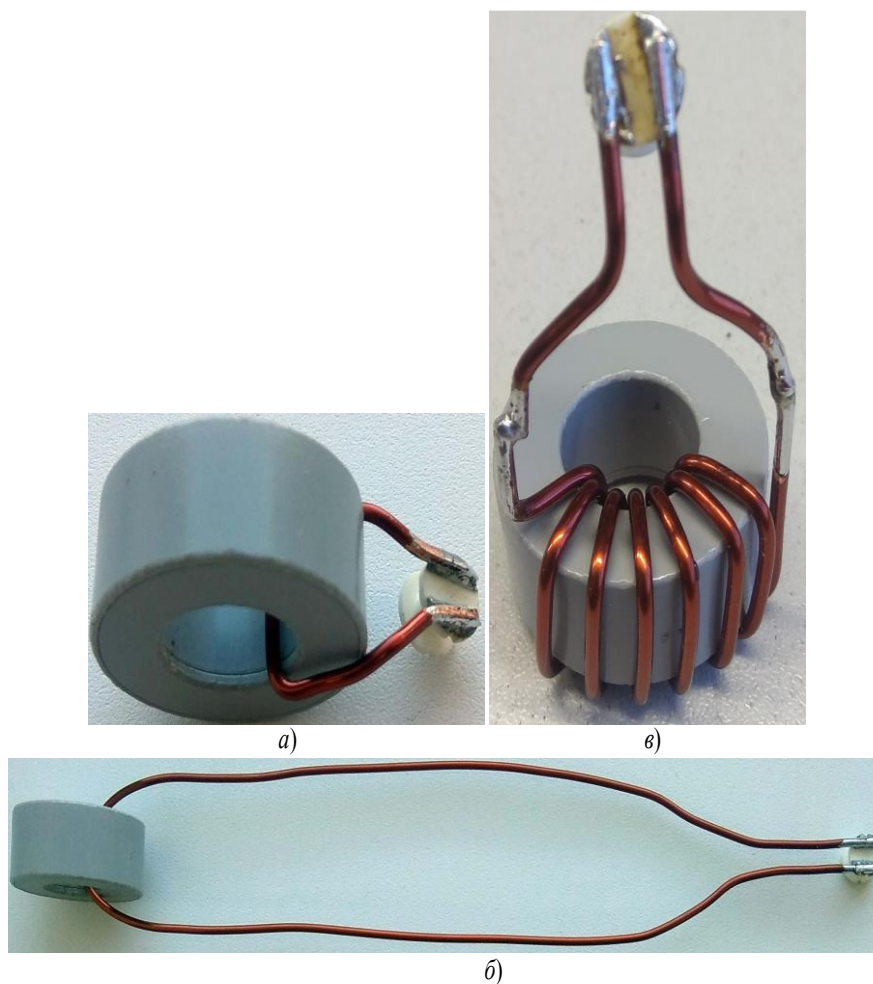


Рис. 3. Дроссель (сердечник MSFN-25S-TH) с различным количеством витков и длиной провода: а) 1 виток (6 см), б) 1 виток (38 см), в) 7 витков (38 см)

**Комплексное сопротивление дросселя на феррите.** В [1] были проведены измерения модуля и фазы полного (комплексного) сопротивления дросселей с кольцевым сердечником из феррита N87 на анализаторах импеданса Keysight E4982A (в диапазоне частот от 1 МГц до 3 ГГц) и E7-28 (в диапазоне частот 1 кГц до 1 МГц). На рис. 1 (цифра 1) показаны измерения модуля и фазы комплексного сопротивления дросселя с одним витком. После этого совместно с сотрудниками НТЦ СЗЛ

(г. Санкт-Петербург) были измерены модуль и фаза комплексных сопротивлений дросселей, намотанных на том же самом сердечнике, но другой партии, с большим количеством витков. На рис. 1 (цифры 2 и 3) показаны модуль и фаза комплексного сопротивления этих измеренных дросселей с одним и семью витками соответственно. Кольцевой сердечник имел размеры  $50 \times 28,6 \times 20,3$  мм. Провод был длиной 60 см и  $\varnothing = 0,95$  мм.

Измеренные частотные характеристики комплексного сопротивления дросселя (рис. 2) показывают, что изменение числа витков дросселя с данным типом сердечника приводит лишь к изменению модуля комплексного сопротивления дросселя в отличие от дросселя, с ферритовым сердечником (рис. 1). Изменение фазы комплексного сопротивления дросселя связано с наличием емкости, зависящей лишь от длины провода (рис. 2). Это связано с тем, что начинает проявляться эффект длинных линий, что будет рассмотрено. Таким образом, достаточно сделать схему замещения для одновиткового дросселя, её будет легко масштабировать для любого количества витков и размеров сердечника. По аналогии с [1] для понимания методики синтеза схемы замещения реального дросселя частотные характеристики модуля и фазы его измеренного комплексного сопротивления были разбиты на шесть характерных участков (рис. 4), в которых проявляются различные физические характеристики реального дросселя.

Для данного сердечника (MSFN-25S-TH) по измеренному сопротивлению одновиткового дросселя (рис. 2, кривая 1) была определена комплексная проницаемость материала сердечника (рис. 5)

$$\dot{\mu}(j\omega) = \mu'(j\omega) - j\mu''(j\omega), \quad (1)$$

где  $\mu'$ ,  $\mu''$  – вещественная и мнимая составляющие комплексной магнитной проницаемости материала, которые определяются как

$$\mu'(j\omega) = \frac{|Z_L(j\omega)|}{\omega \cdot \mu_0 \cdot K_\Phi \cdot K_{3АП}} \sin(\arg(Z_L(j\omega))), \quad (2)$$

$$\mu''(j\omega) = \frac{|Z_L(j\omega)|}{\omega \cdot \mu_0 \cdot K_\Phi \cdot K_{3АП}} \cos(\arg(Z_L(j\omega))), \quad (3)$$



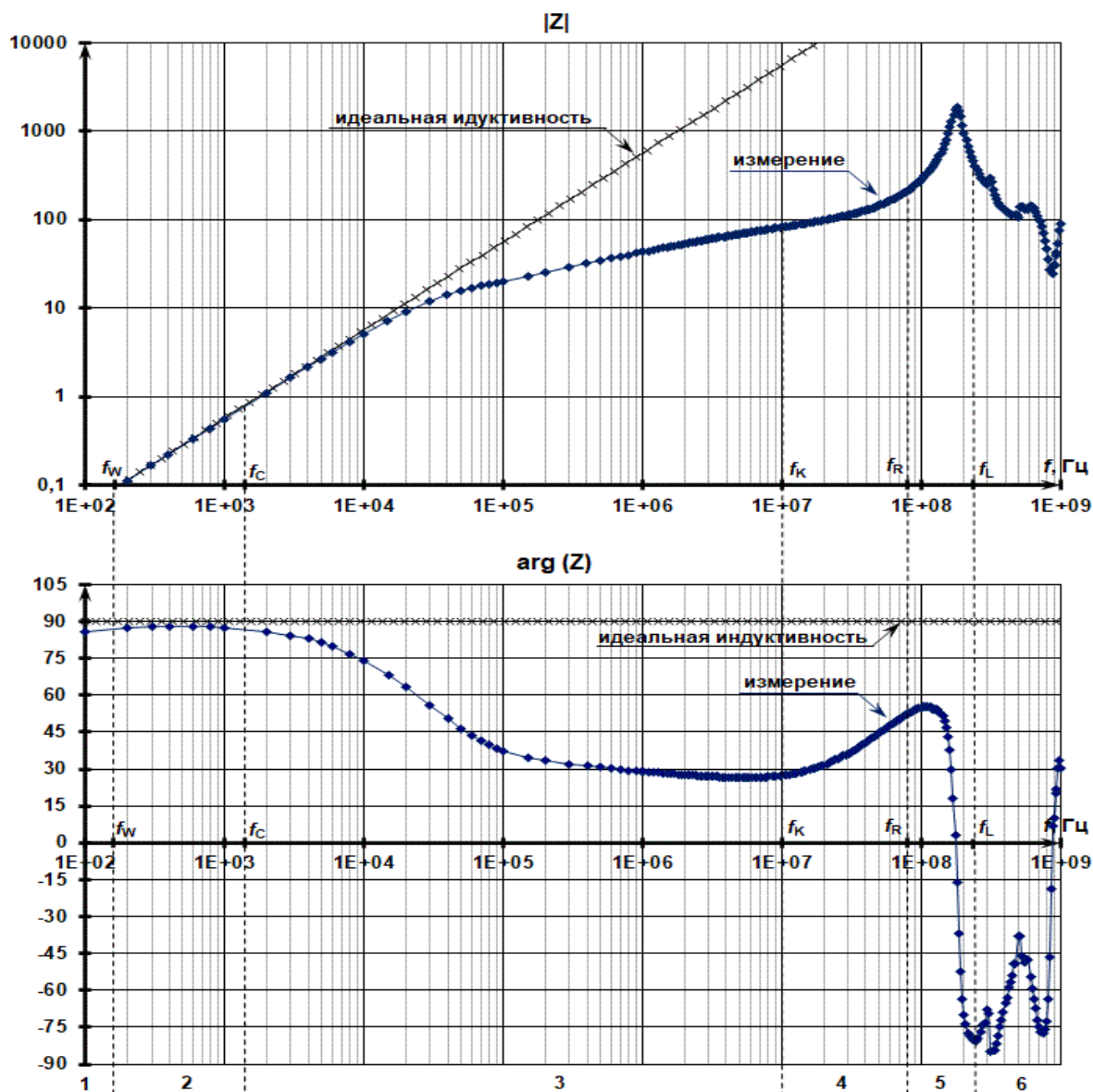


Рис. 4. Разбивка на области модуля и фазы комплексного сопротивления дросселя

где  $Z_L$  – измеренное комплексное сопротивление дросселя;  $K_\phi = \frac{h}{2\pi} \ln \frac{R}{r}$  – коэффициент формы, введенный в [1], характеризующий геометрические размеры сердечника:  $h$  – высота тороидального сердечника,  $R$  – наружный радиус тороидального сердечника,  $r$  – внутренний радиус тороидального сердечника;  $K_{\text{зап}}$  – коэффициент заполнения тора сердечника материалом (для этого материала по ТУ  $K_{\text{зап}} = 0,72$ ).

**Низкочастотная область (участки 1 и 2 на рис. 4).** Из измеренных частотных характеристик комплексного сопротивления дросселя можно сделать вывод, что реальный дроссель представляет собой идеальную катушку индуктивности лишь в достаточно узком интервале частот: от 150 Гц – 1,5 кГц (рис. 4). Это соответствует участку 2 на рис. 4, что хорошо



видно по фазе комплексного сопротивления (когда фаза близка  $90^\circ$ ). Это также соответствует области частот, в которой магнитная проницаемость материала практически постоянна, т.е.  $\dot{\mu}(j\omega) \approx \mu$  (рис. 5). В этом случае индуктивность дросселя с тороидальным сердечником определяется классической формулой [9] с учетом коэффициента заполнения  $K_{ЗАП}$  (особенность витых ленточных магнитопроводов):

$$L = \mu_0 \mu \cdot n^2 \cdot K_\Phi \cdot K_{ЗАП}, \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость сердечника,  $n$  – количество витков.

Для данного сердечника ( $25 \times 16 \times 10$  мм) получаем  $K_\Phi = 0,71 \cdot 10^{-3}$ . При магнитной проницаемости сердечника  $\mu = 1,37 \cdot 10^5$  (рис. 5) и  $K_{ЗАП} = 0,72$  получаем расчетное значение индуктивности одновиткового дросселя  $L = 88$  мкГн, практически близко индуктивности  $L = 89,2$  мкГн, полученной из частотных характеристик экспериментально измеренного комплексного сопротивления дросселя (рис. 4). Причина такого небольшого различия полученных значений индуктивностей будет рассмотрена далее.

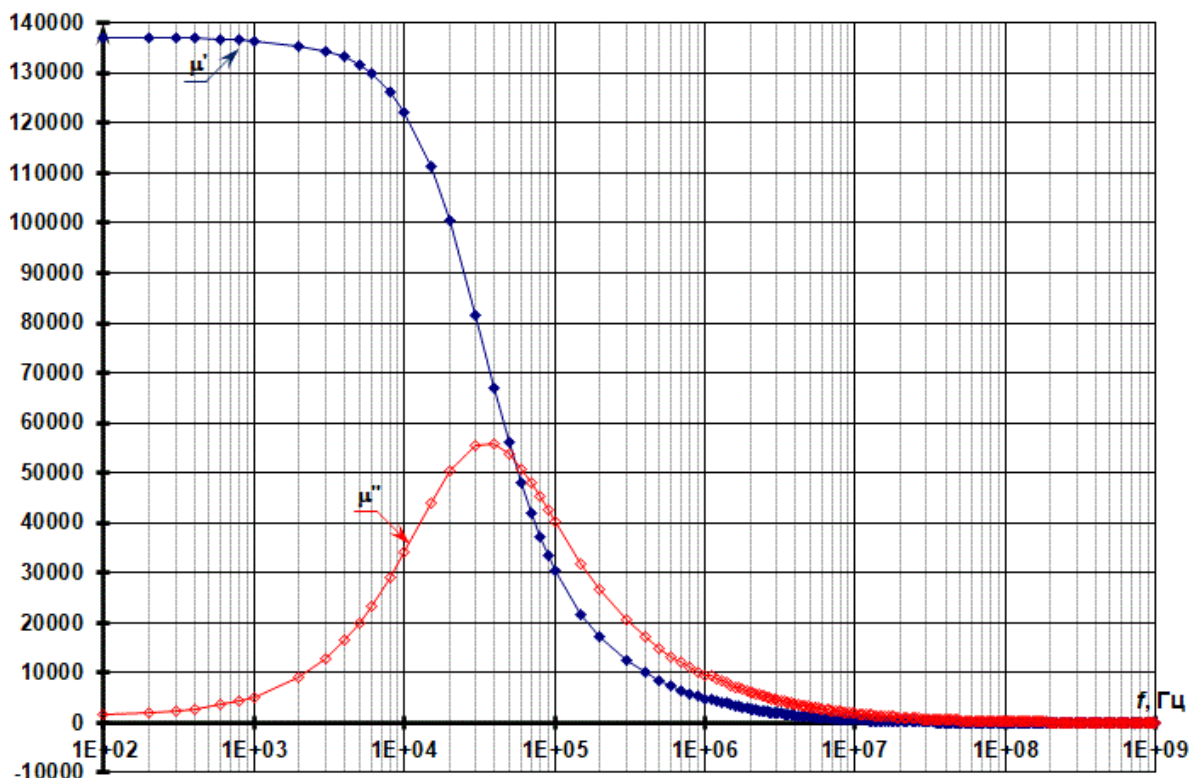


Рис. 5.  $\mu'(j\omega)$  и  $\mu''(j\omega)$  для сердечника MSFN 25S-TH (из измерения сопротивления дросселя)

На частотах значительно ниже 150 Гц начинает сказываться сопротивление провода (для одновиткового дросселя), и реальный дроссель представляет собой последовательное сопротивление резистора  $R_w$  (сопротивление провода) и идеальной катушки индуктивности  $L$  (рис. 6). Условие, когда реальный дроссель можно считать идеальной катушкой индуктивности, можно записать следующим образом [1]:

$$f \geq f_w, \text{ где } f_w = (9-10) \frac{R_w}{L}. \quad (5)$$

Сопротивление провода  $R_w$  было измерено: 3,2 мОм (для провода 38 см). Тогда, используя (5), получаем частоту  $f_w$  порядка 300 Гц (для одновиткового дросселя с длиной провода 38 см). Т.к. частота  $f_w$  определялась из условия отличия фазы от  $90^\circ$  на  $1-2^\circ$ [1], то во многих практических применениях её можно разделить на 2, что и видно по рис. 4. Таким образом, получаем  $f_w = 150$  Гц.

Определение верхней частоты  $f_c$  (рис. 4), когда дроссель можно считать ещё идеальным, тоже следует определять по фазе комплексного сопротивления дросселя. Если определять эту частоту по графику модуля, то получим значение порядка 10 – 20 кГц. А на этих частотах фаза уже составляет порядка  $75^\circ - 60^\circ$  (рис. 4). Т.е. дроссель представляет собой RL-контур на этих частотах. Таким образом, только фаза комплексного сопротивления позволяет корректно определить, когда реальный дроссель можно считать идеальной индуктивностью, и измерять индуктивность дросселя нужно только в этом диапазоне частот. Измерения на всех остальных частотах будет давать некорректный результат.



Рис. 6. Низкочастотная схема замещения дросселя

**Комплексное сопротивление провода.** Для используемого провода диаметром 1,5 мм, длиной 6 см и 38 см (рис. 7) было измерено комплексное сопротивление (рис. 8), из которого видно, что провод на частотах выше единиц кГц уже нельзя считать резистором, а начиная с 1 МГц – это уже идеальная индуктивность. Из экспериментально измеренных модуля и фазы комплексного сопротивления провода (рис. 8)

были определены параметры схемы замещения провода (рис. 9):  $L_W = 0,27$  мкГн,  $R_W = 3,2$  мОм,  $C_R = 2,5$  пФ,  $R_R = 10$  кОм (для провода длиной 38 см) и  $L_W = 0,023$  мкГн,  $R_W = 0,4$  мОм,  $C_R \approx 0,8$  пФ,  $R_R \approx 10$  кОм (для провода длиной 6 см). Измерения проводилось для проводов в виде плоской петли (рис. 7).

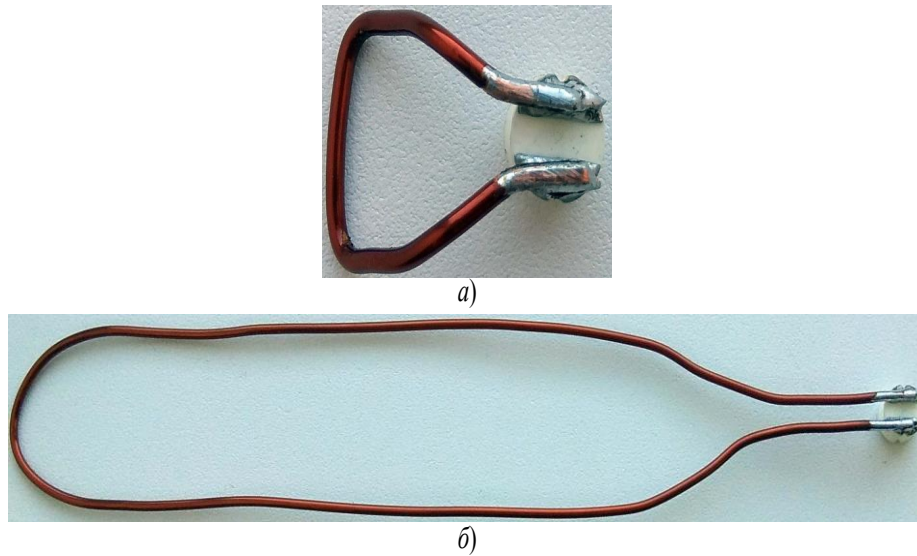


Рис. 7. Провод разной длины: а) 6 см, б) 38 см

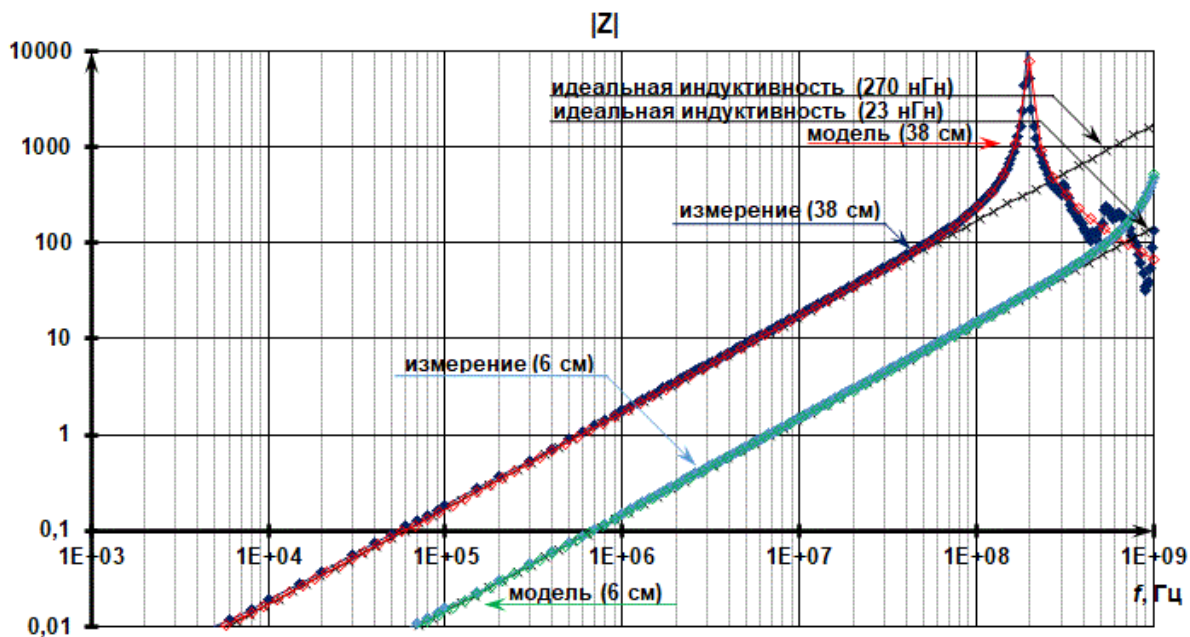
Сопротивление провода можно определить по известной формуле:

$$R_W = \rho \frac{l}{\pi r^2}, \quad (6)$$

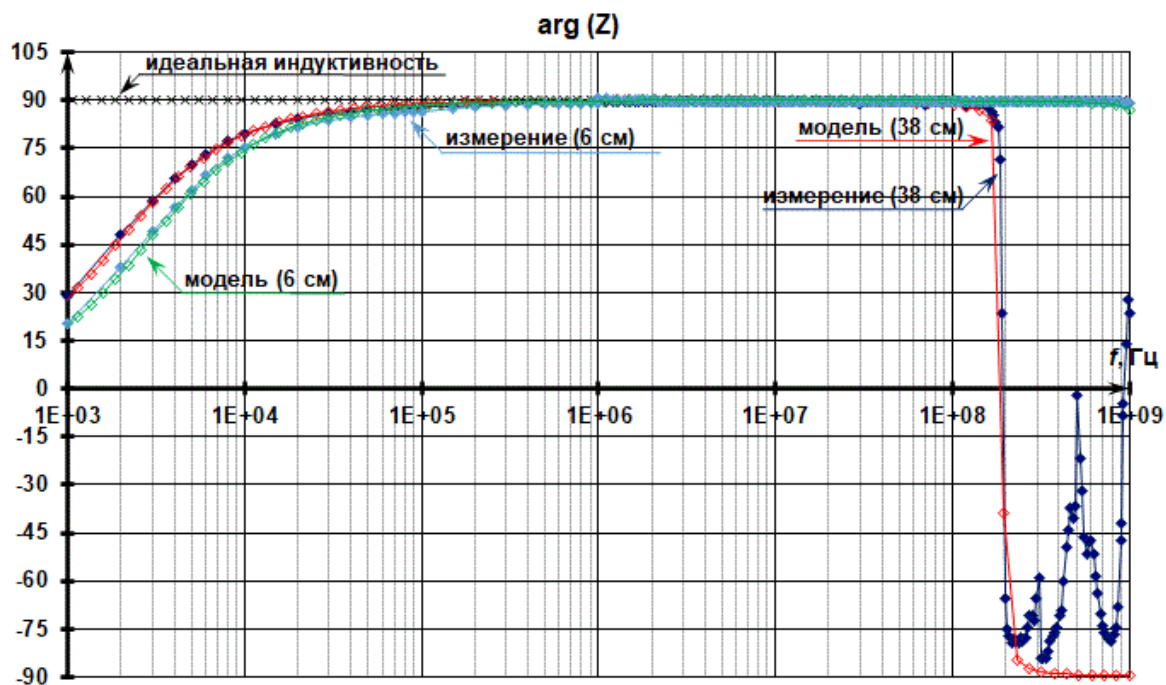
где  $\rho$  – удельное сопротивления вещества провода (для меди оно равно  $0,0175$  Ом/(мм<sup>2</sup>·м)),  $l$  – длина провода в м,  $r$  – радиус поперечного сечения провода в мм.

Для провода диаметром 1,5 мм и длиной 38 см, используя (6), получаем сопротивление 3,76 мОм, что достаточно близко значению, определенному в схеме замещения (3,2 мОм) из условия близости частотных характеристик схемы замещения и экспериментально измеренных частотных характеристикам провода (рис. 8). Аналогично для провода длиной 6 см получаем сопротивление 0,59 мОм. Но оно уже отличается от значения, определенного в схеме замещения (0,4 мОм). Из рис. 8 видно, что при малой длине (6 см) провода получаем ошибку в определении ФЧХ, что говорит о погрешности измерения провода малой длины в этой области

частот данным прибором (Keysight E4980AL), которая и дает ошибку в определении сопротивления провода порядка 30%.



a)



б)

Рис. 8. Модуль (a) и фазы (б) комплексного сопротивления провода ( $\varnothing = 1,5$  мм) разной длины (6 см и 38 см): измеренное значение в сравнении со схемой замещения

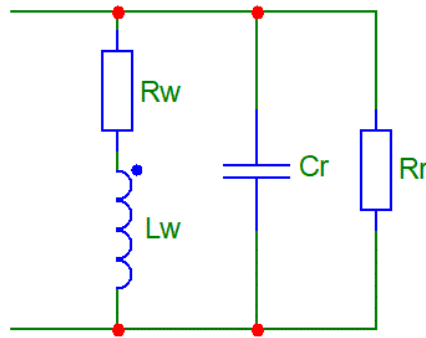


Рис. 9. Схема замещения провода

Индуктивность прямолинейного провода кругового сечения можно определить по следующей формуле [10]:

$$L_w = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{2l}{r} \right) - \frac{3}{4} \right), \text{ Гн, или } L_w = 0,2 \cdot l \left( \ln \left( \frac{4l}{d} \right) - \frac{3}{4} \right), \text{ мкГн,} \quad (7)$$

где  $d$  – диаметр провода.

Для провода диаметром 1,5 мм и длиной 38 см, используя (7), получаем индуктивность 0,469 мкГн, что значительно расходится с индуктивностью, определенной в схеме замещения (0,27 мкГн). Для провода длиной 6 см, используя (7), получаем индуктивность 0,043 мкГн, что также расходится с индуктивностью, определенной в схеме замещения (0,023 мкГн). Измерения индуктивности провода на приборе Е7-5 (измерительный мост) дали близкие результаты для проводов 38 см и 6 см: 0,27 мкГн и 0,02 мкГн.

Данные различия значений полученных индуктивностей с индуктивностями, рассчитанными по (7), связаны с тем, что измерения проводились для проводов в виде плоской петли (рис. 7), а формула (7) дана для прямолинейного провода. Измерить прямолинейный провод указанных длин на известных приборах невозможно.

**Влияние материала сердечника дросселя (участок 3 на рис. 4).** На частотах выше 1,5 кГц (рис. 4) характер комплексного сопротивления дросселя зависит от изменения магнитных свойств материала сердечника (рис. 5). Это связано с тем, что относительная магнитная проницаемость материала не является константой  $\mu$ , а является частотно-зависимой комплексной величиной  $\mu(j\omega)$  [11–13].

Снижение фазы комплексного сопротивления дросселя начинается с 1 кГц (рис. 4). Это связано с проявлением резистивных потерь в сердечнике – падением вещественной и увеличением мнимой составляющих

комплексной магнитной проницаемости материала (рис. 5). Поэтому на этом участке частот дроссель можно заменить параллельным RL-контуром (рис. 10,а) с сопротивлением:

$$Z_L(j\omega) = \frac{j\omega L}{1 + j\omega L/R_C} = \frac{\omega L}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} e^{j(90^\circ - \arctg\omega\tau)}, \quad (8)$$

где  $\tau = L/R_C$  – постоянная времени.

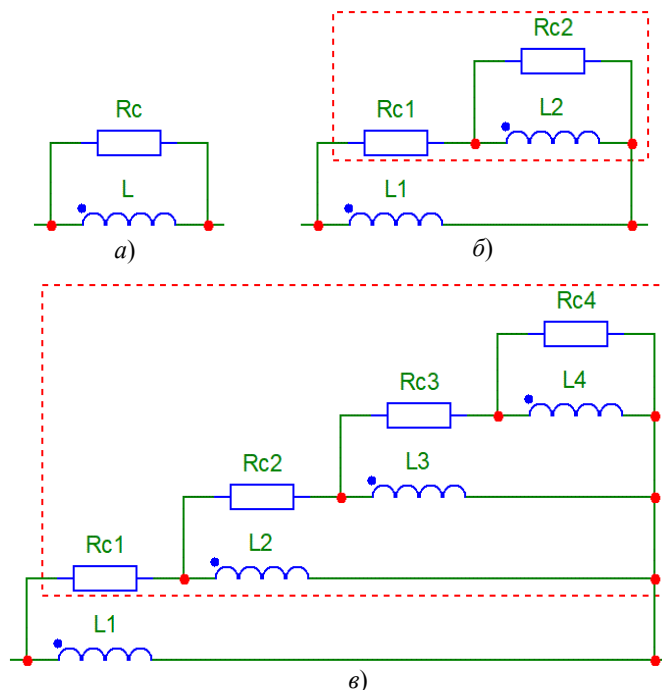


Рис. 10. Схемы замещения дросселя, учитывающие влияния сердечника

Частотные характеристики сопротивления схемы замещения и измеренные имеют хорошее совпадение до 60 кГц (рис. 11, кривая 1). Параметры полученной модели (рис. 10,а):  $L = 89,2$  мкГн,  $R_C = 22$  Ом. Чтобы получить хорошее совпадение на более высоких частотах (рис. 11, кривая 2) необходимо вместо постоянного сопротивления  $R_C$  (рис. 10,а) использовать частотно-зависимое сопротивление, добавив в схему замещения RL-контур (рис. 10,б). Тогда сопротивление дросселя:

$$Z_L(j\omega) = \frac{j\omega L_1 \left( 1 + j\omega L_2 \frac{R_{C1} + R_{C2}}{R_{C1} R_{C2}} \right)}{1 - \omega^2 \frac{L_1 L_2}{R_{C1} R_{C2}} + j\omega \left( L_2 \frac{R_{C1} + R_{C2}}{R_{C1} R_{C2}} + \frac{L_1}{R_{C1}} \right)} =$$



$$= \omega L \sqrt{\frac{1 + \omega^2 \tau_0^2}{(1 - \omega^2 \tau_1 \tau_2)^2 + \omega^2 (\tau_1 + \tau_0)^2}} e^{j \left( 90^\circ + \arctg \omega \tau_0 - \arctg \frac{\omega (\tau_1 + \tau_0)}{1 - \omega^2 \tau_1 \tau_2} \right)}, \quad (9)$$

где  $L = L_1$  – индуктивность дросселя;  $\tau_1 = L_1/R_{C1}$ ,  $\tau_2 = L_2/R_{C2}$ ,  
 $\tau_0 = L_2 \left( \frac{1}{R_{C1}} + \frac{1}{R_{C2}} \right)$  – постоянные времени. Частотные характеристики сопротивления схемы замещения и измеренные имеют хорошее совпадение до 600 кГц (рис. 11, кривая 2).

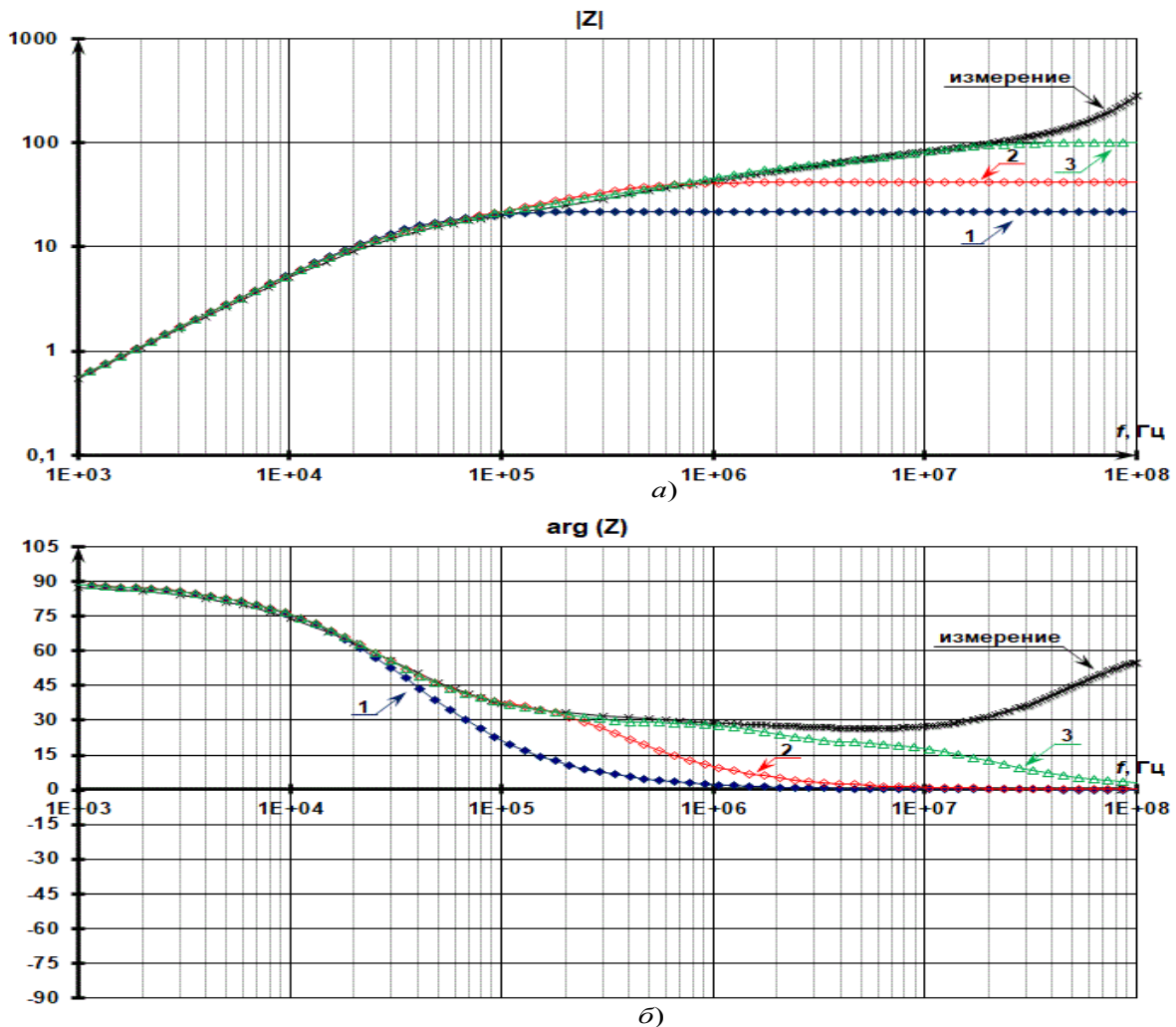


Рис. 11. Модуль (а) и фазы (б) комплексного сопротивления дросселя: измеренное значение в сравнении с различными схемами замещения: 1) рис. 8а, 2) рис. 8б, 3) рис. 8в

Параметры полученной модели (рис. 10б):  $L_1 = 89,2$  мкГн,  $L_2 = 14$  мкГн,  $R_{C1} = 22$  Ом,  $R_{C2} = 20$  Ом. Для дальнейшего совпадения частотных характеристик необходимо ещё несколько RL контуров (рис. 10в).

В этом случае получаем достаточно хорошее совпадение частотных характеристик (измеренных и схемы замещения) до 10 МГц. Выше 10 МГц начинается следующий участок (№4) комплексного сопротивления дросселя (рис. 4). Параметры полученной модели (рис. 10в):  $L_1 = 89,2$  мкГн,  $L_2 = 14$  мкГн,  $L_3 = 4$  мкГн,  $L_4 = 0,5$  мкГн,  $R_{C1} = 22$  Ом,  $R_{C2} = 20$  Ом,  $R_{C3} = R_{C4} = 30$  Ом.

В [2, 3] такая зависимость модуля и фазы комплексного сопротивления дросселя объяснялась действием скин-эффекта. Однако скин-эффект – это явление при протекании тока в проводнике, а данная характеристика комплексного сопротивления определяется только комплексной магнитной проницаемостью сердечника. При скин-эффекте из-за переменного магнитного поля возникает переменное электрическое поле, выталкивающее электрические заряды из проводника, а на частотных характеристиках комплексного сопротивления дросселя в этой области частот (где фаза больше нуля) наблюдается превосходство действия магнитного поля над действием электрического поля.

Определим частоту  $f_c$  (рис. 4), начиная с которой необходимо учитывать влияние изменения магнитных свойств материала сердечника. Для этого воспользуемся фазой комплексного сопротивления дросселя, т.е.  $\arg(Z(j\omega_c)) < 89^\circ$ . Используя (8), получаем  $\arctg\omega t > 1^\circ$  или

$$\omega_c L/R_c > 0,0175. \quad (10)$$

Частота, начиная с которой необходимо учитывать влияние изменения магнитных свойств материала сердечника, определяется как

$$f > f_c, \text{ где } f_c = \frac{R_c}{360 \cdot L}, \quad (11)$$

что аналогично формуле, полученной в [1] для ферритового сердечника. В нашем случае ( $L = 89,2$  мкГн,  $R_c = 22$  Ом) получаем  $f_c = 623$  Гц. Т.к. частота  $f_c$  определялась из условия отличия фазы от  $90^\circ$  на  $1^\circ$ , то во многих практических применениях её можно увеличить в 2 раза, что и видно по рис. 4, 11. Таким образом, получаем  $f_c = 1,2$  кГц.

**Высокочастотная область (участки 4 и 5 на рис. 4).** После 10 МГц происходит увеличение модуля и фазы комплексного сопротивления дросселя (рис. 4). Это равносильно тому, что в схеме замещения дросселя добавляется последовательно включенная индуктивность  $L_w$  (рис. 12).

Величина этой индуктивности равна индуктивности провода  $L_w = 0,27$  мкГн. Т.е. в этом диапазоне частот комплексное сопротивление,

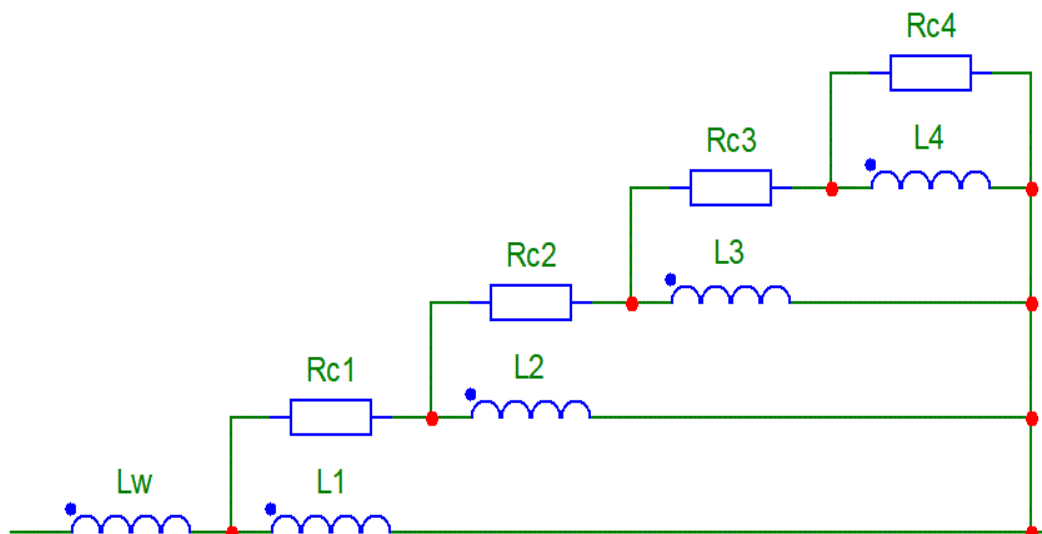


Рис. 12. Схема замещения дросселя с учетом индуктивности провода

определяемое сердечником, уже будет соизмеримо с комплексным сопротивлением провода (влияние индуктивности провода). Чтобы суммарная индуктивность не изменилась, необходимо на эту величину уменьшить индуктивность  $L_1$  (рис. 12). В этом случае имеем хорошее совпадение измеренных модуля и фазы комплексного сопротивления дросселя с частотными характеристиками схемы замещения дросселя до 80 – 90 МГц (рис. 13, кривая 1).

При дальнейшем увеличении частоты наблюдается ВЧ-резонанс комплексного сопротивления дросселя на частоте 180 МГц (рис. 4, 13). Данная частота близка частоте ВЧ-резонанса (198 МГц) комплексного сопротивления провода (рис. 8). Из этого следует, что на комплексное сопротивление дросселя на частотах от 10 МГц до 80 – 90 МГц (участок 4 на рис. 4) начинает оказывать влияние индуктивность провода, а на частотах выше 80 – 90 МГц (участок 5 на рис. 4) начинают оказывать влияния параметры схемы замещения провода:  $C_R = 2,5$  пФ,  $R_R = 10$  кОм. В этом случае схема замещения дросселя (рис. 14) дает частотные характеристики достаточно близкие измеренным частотным характеристикам комплексного сопротивления дросселя до 400 – 500 МГц (рис. 13, кривая 2).

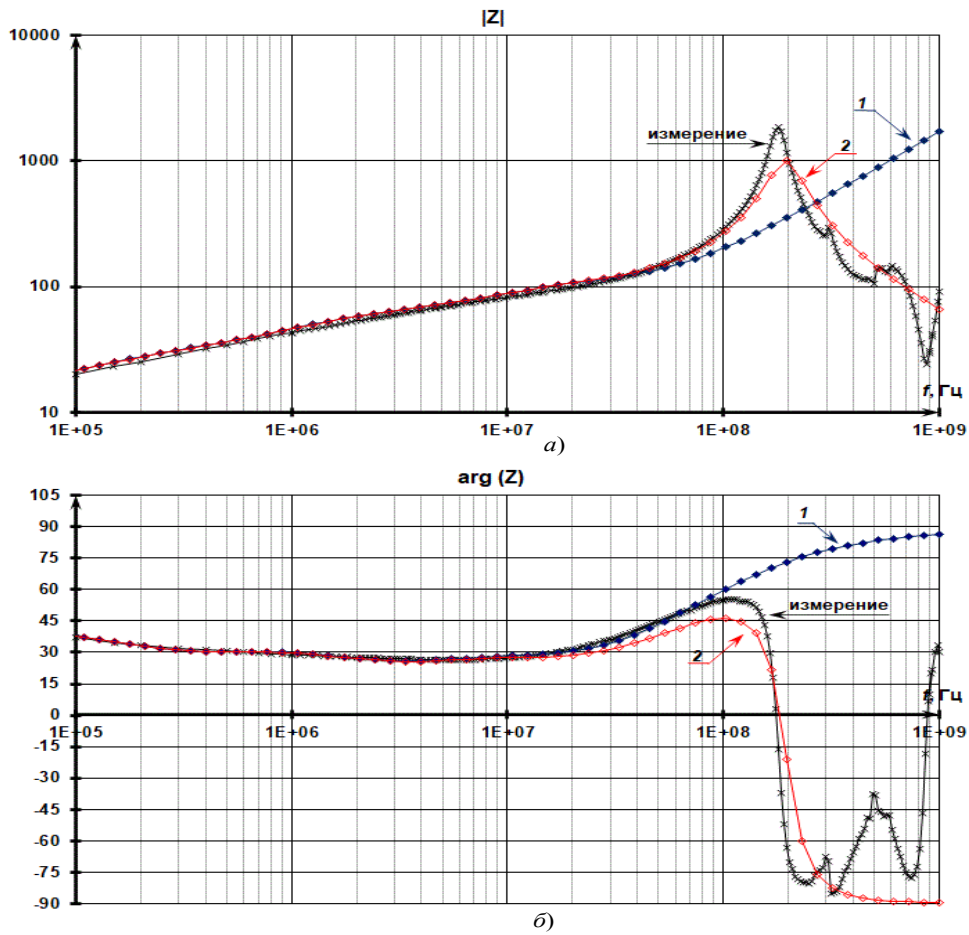


Рис. 13. Модуль (а) и фазы (б) комплексного сопротивления дросселя:  
 измеренное значение в сравнении с различными схемами замещения провода:  
 1) с учетом только индуктивности провода, 2) с учетом всех параметров провода

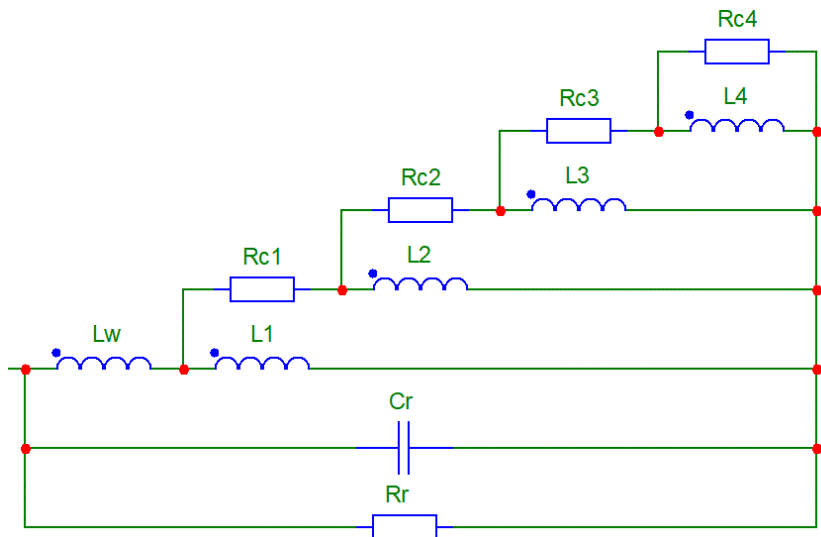


Рис. 14. Схема замещения дросселя с учетом параметров провода

**Разделение влияния провода и сердечника в схеме замещения дросселя.** Изменение количества витков дросселя с использованием сердечника из нанокристаллического сплава на основе железа приводит лишь к изменению модуля комплексного сопротивления дросселя (рис. 2). Для масштабирования схемы замещения одновиткового дросселя (рис. 14) на любое количество витков разнесем по отдельным схемам влияние сердечника и провода дросселя и свяжем их источником напряжения  $E1$ , управляемым напряжением сердечника, и источником тока  $G1$ , управляемым током, протекающим в проводе (рис. 15).

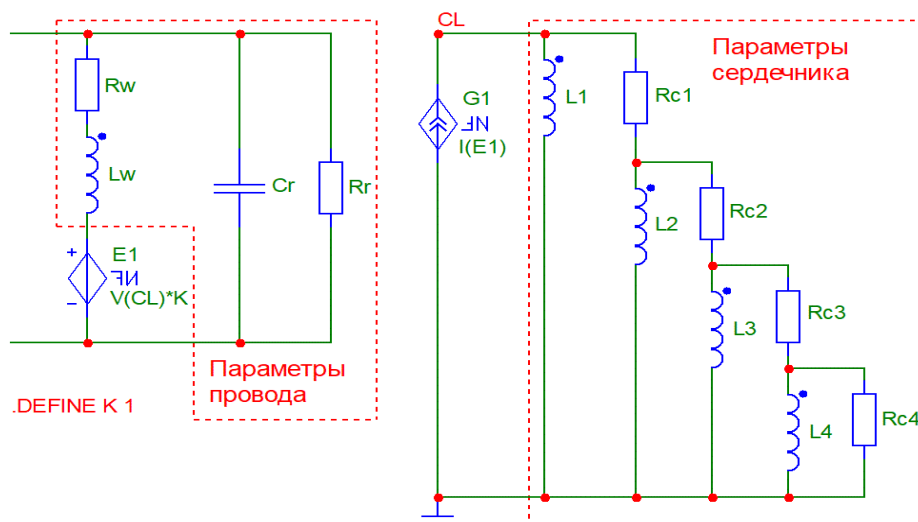


Рис. 15. Схема замещения дросселя с произвольным количеством витков

**Уточнение схемы замещения дросселя.** До этого момента рассматривалось комплексное сопротивление с разным количеством витков, но с одинаковой длиной провода. В реальности же меньшее количество витков имеет меньшую длину провода. Поэтому скорректируем схему замещения дросселя (рис. 15) для случая одного витка минимальной длины (6 см). На рис. 2, кривая 1 представлены измеренные модуль и фаза комплексного сопротивления этого дросселя.

Для этого случая была скорректирована схема замещения сердечника дросселя: добавлен RL-контур (рис. 16), и были получены частотные характеристики получившейся схемы замещения, которые достаточно близки измеренным модулю и фазе комплексного сопротивления дросселя (рис. 17). Параметры получившейся модели сердечника дросселя:  $L_1 = 88,9$  мкГн,  $L_2 = 14$  мкГн,  $L_3 = 4$  мкГн,  $L_4 = 0,5$  мкГн,  $L_5 = 0,075$  мкГн,  $R_{C1} = 22$  Ом,  $R_{C2} = 20$  Ом,  $R_{C3} = R_{C4} = 30$  Ом,  $R_{C5} = 15$  Ом.

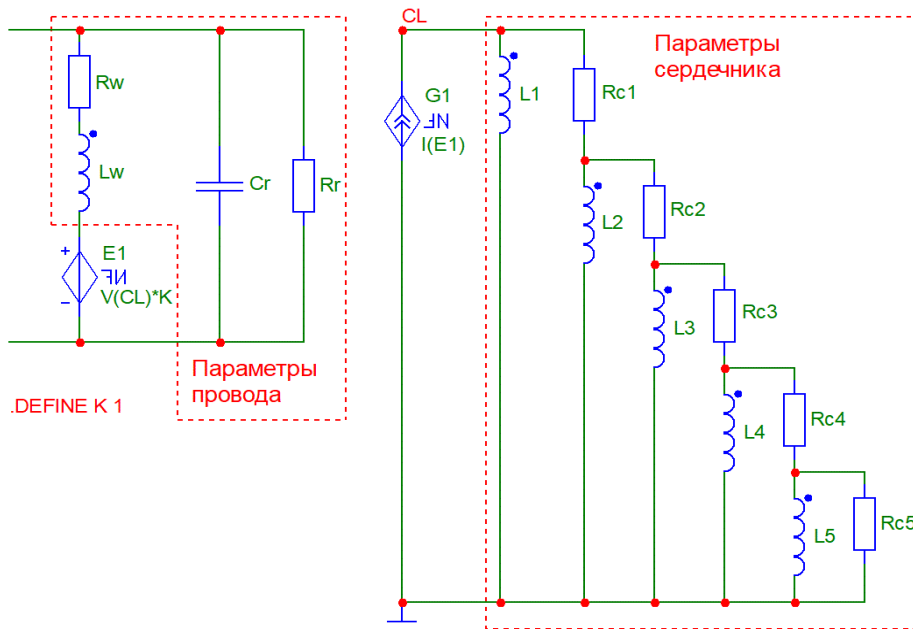


Рис. 16. Схема замещения дросселя

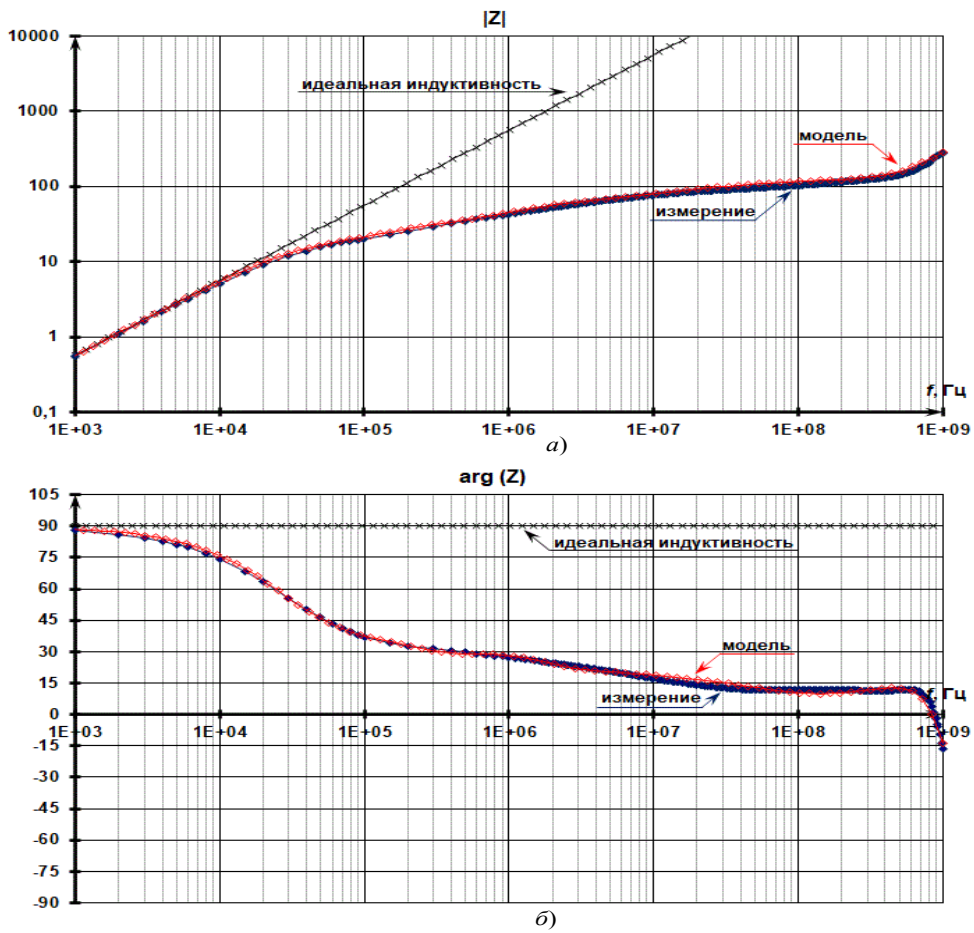


Рис. 17. Модуль (а) и фазы (б) комплексного сопротивления одновиткового дросселя (6 см): измеренное значение в сравнении со схемой замещения (рис. 14)



В этом случае (для одновиткового дросселя) получаем те же самые частотные характеристики комплексного сопротивления (рис. 18, кривые 1, 2).

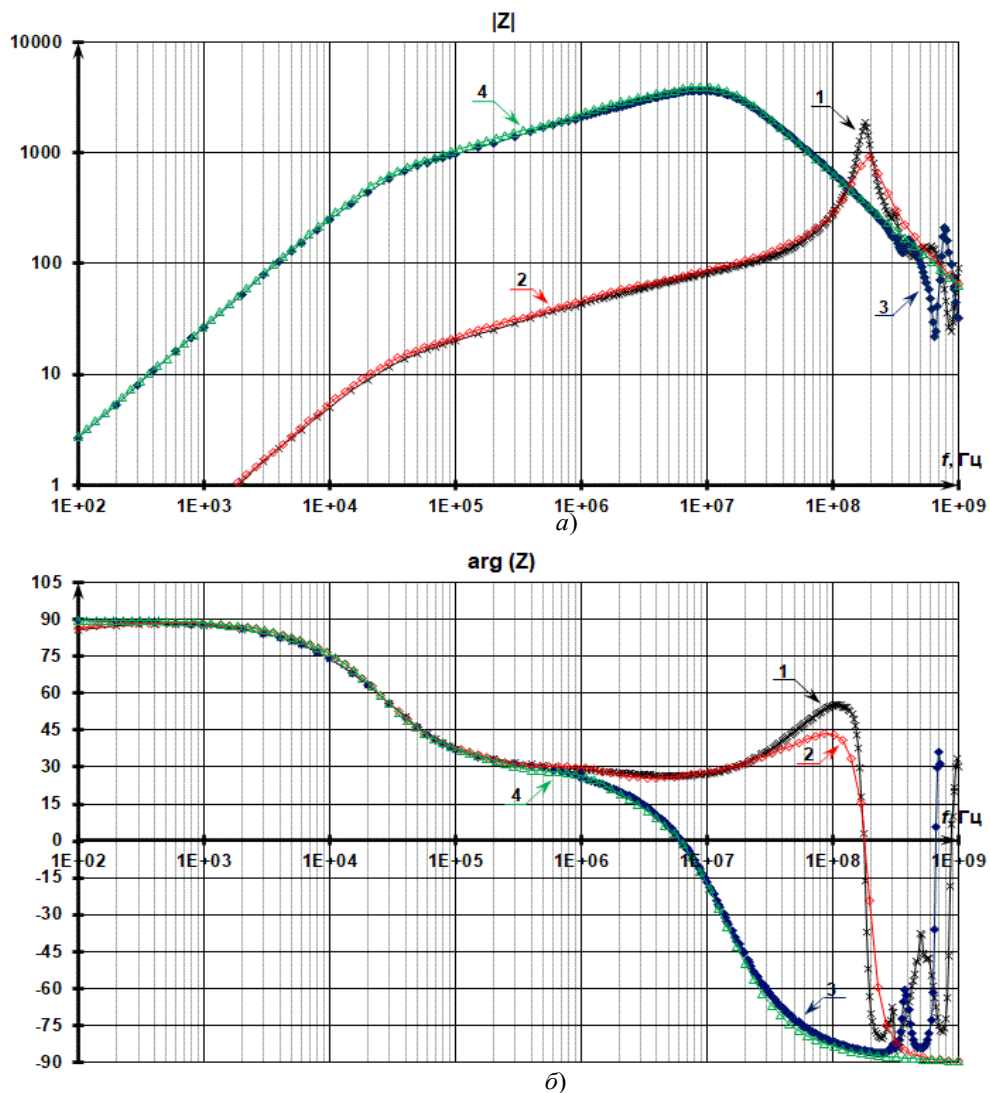


Рис. 18. Модуль (а) и фазы (б) комплексного сопротивления дросселя с разным количеством витков (1 и 7): измеренное значение в сравнении со схемой замещения (рис. 16)

Чтобы получить частотные характеристики для дросселя с 7 витками в схеме замещения на рис. 16, изменяются параметр  $K$  с 1 до 49 и значение сопротивления  $R_R$  с 10 кОм до 500 кОм. В этом случае частотные характеристики схемы замещения дросселя достаточно близки измеренным характеристикам комплексного сопротивления дросселя с 7-ю витками (рис. 18, кривые 3, 4). Как видно, схема замещения дросселя пересчитывается для любого количества витков (коэффициент  $K$  равен квадрату витков обмотки). При использовании сердечника с другими размерами необходимо в коэффициент  $K$  добавить множитель, равный

отношению нового коэффициента формы  $K_\Phi$  к старому коэффициенту формы  $K_\Phi$ . Для данного сердечника  $25 \times 16 \times 10$  мм  $K_\Phi = 0,71 \cdot 10^{-3}$ .

**Определение комплексной магнитной проницаемости материала сердечника.** Схема замещения дросселя позволяет учитывать влияние провода и сердечника отдельно, вне зависимости от количества витков. Поэтому можно из схемы замещения рис. 16 определить комплексную проводимость сердечника, поделив напряжение на источнике тока  $G1$  на ток через него:  $Z_{G1}(j\omega) = \dot{U}_{G1}(j\omega) / \dot{I}_{G1}(j\omega)$ . Зависимости  $\mu'(j\omega)$  и  $\mu''(j\omega)$  будут рассчитываться по (2) и (3), вместо  $Z_L$  берется  $Z_{G1}$ . Комплексная магнитная проницаемость материала, рассчитанная из схемы замещения и магнитная проницаемость, найденная по измеренному комплексному сопротивлению одновиткового дросселя, показаны на рис. 19.

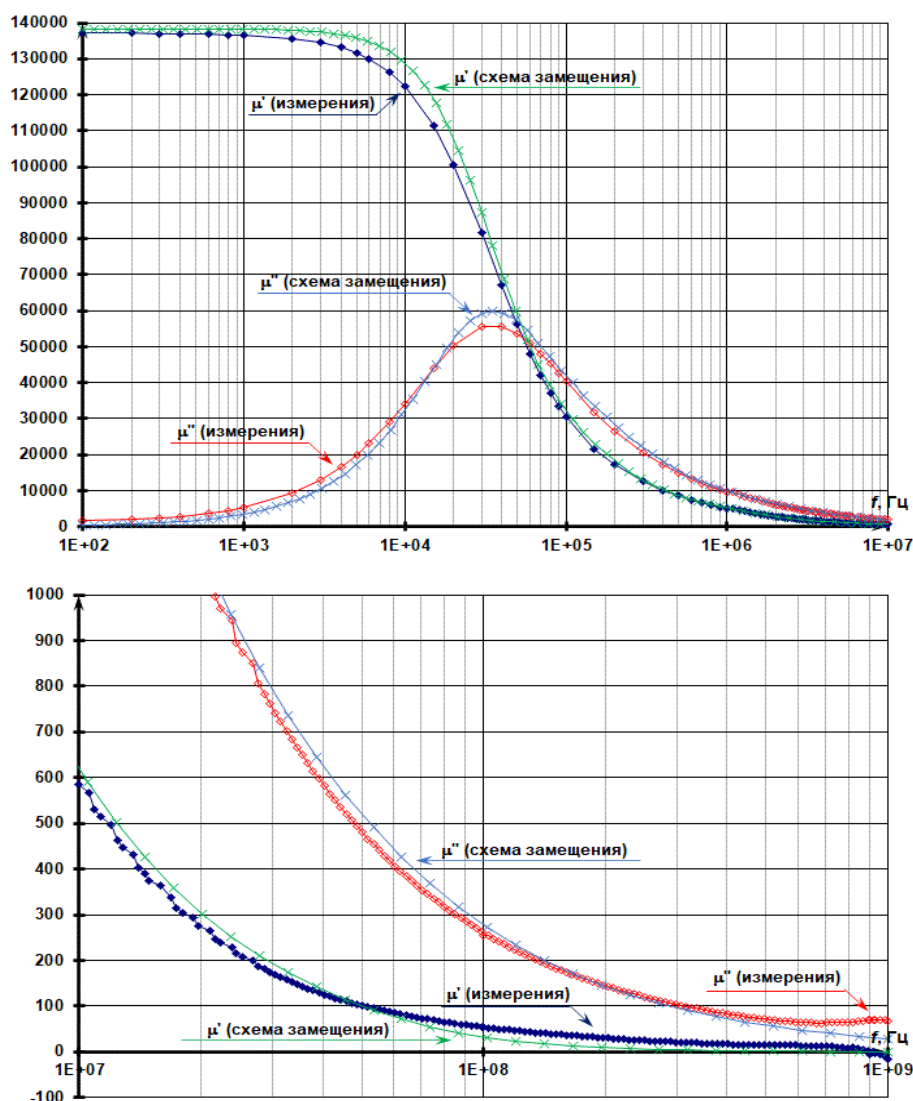


Рис. 19.  $\mu'(j\omega)$  и  $\mu''(j\omega)$  для сердечника MSFN-25S-TH, рассчитанные разным способом

Отсюда получаем скорректированное значение магнитной проницаемости сердечника  $\mu = 1,383 \cdot 10^5$  (рис. 19), дающее расчетное значение индуктивности одновиткового дросселя  $L = 88,9$  мкГн, которое на значение индуктивности провода ( $L_w = 0,27$  мкГн) меньше полученной индуктивности ( $L = 89,2$  мкГн) из измеренных частотных характеристик комплексного сопротивления дросселя. Таким образом, данная схема замещения дросселя (рис. 16) позволяет разделить влияние провода и сердечника. Для более точной модели дросселя необходимо непосредственно измерить комплексную магнитную проницаемость материала сердечника, и уже на основании этих частотных характеристик скорректировать параметры сердечника в модели дросселя (рис. 16).

Различие в определении комплексной магнитной проницаемости можно разделить на 3 участка: низкочастотная область (до единиц кГц) – при вычислении  $\mu'$  и  $\mu''$  из измерения комплексного сопротивления дросселя оказывает влияние индуктивность и сопротивление провода (рис. 19); среднечастотная область (от единиц кГц до 500 МГц) – только погрешность схемы замещения сердечника (рис. 19); высокочастотная область (выше 500 МГц) – при вычислении  $\mu'$  и  $\mu''$  на расчет из измерения комплексного сопротивления дросселя оказывают влияния индуктивность и емкость провода (рис. 19). Как видно из рис. 19,  $\mu'$  материала сердечника стремится к единице (на частоте 1 ГГц), а  $\mu''$  материала сердечника порядка 30 (на частоте 1 ГГц). Поэтому сердечник на этой частоте теряет магнитные свойства и работает только на поглощение (нагрев), а дроссель становится резистором (если не учитывать свойства провода).

Итак, начиная с частот 500–600 МГц, комплексное сопротивление данного дросселя – это сумма комплексного сопротивления провода и небольшого активного сопротивления, характеризующего тепловые потери в сердечнике. Такое разделение в схеме замещения дросселя (рис. 16) позволяет вычислить  $\mu'$  и  $\mu''$  материала сердечника без влияния параметров провода и количества витков. Преимущество предложенного разделения заключается в том, что на основе этой схемы замещения дросселя можно небольшими изменениями сделать схему замещения двух- или трехобмоточного дросселя, а также трансформатора. Для этого необходимо в схему замещения дросселя (рис. 16) добавить параметры провода каждой

новой обмотки, скорректировать коэффициенты в зависимых источниках и добавить влияние индуктивности рассеивания.

**Определение ВЧ-емкости (участок 5 на рис. 4).** Рассмотрим подробнее эффект ВЧ-емкости в дросселе с одним витком с разной длиной провода (6 и 38 см) и в дросселе с семью витками с длиной провода 38 см (рис. 17, 18). Считается, что в одновитковом дросселе причина возникновения ВЧ-емкости – это емкость в схеме замещения провода, моделирующая первый резонанс сопротивления провода из-за того, что провод на этих частотах (80 – 220 МГц) уже представляет собой длинную линию (рис. 20).

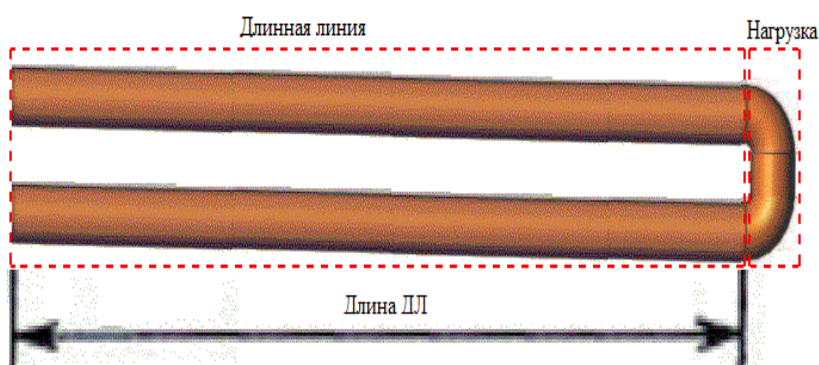


Рис. 20. Представление провода в виде длинной линии

Проверим, так ли это? В общем случае длина волны электромагнитного колебания  $\lambda$  равна

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon\mu} \cdot f}, \quad (12)$$

где  $C_0 = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} \approx 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме,  $\epsilon$  и  $\mu$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости материала.

Для провода длиной 38 см наблюдается резонанс комплексного сопротивления на частоте порядка  $1,98 \cdot 10^8$  Гц (рис. 8). Поскольку провод находится в воздухе ( $\epsilon = \mu = 1$ ), получаем длину волны  $\lambda = 3 \cdot 10^8 / 1,98 \cdot 10^8 = 1,5$  м, то есть на этой частоте в длину провода укладывается  $1/4$  длины волны электромагнитного колебания. В то же время провод длиной 38 см можно представить длинной линией, меньшей 19 см, то есть – половиной длины провода (рис. 20). Это означает, что если представить провод длинной линией, то её длина будет составлять  $0,13\lambda$ , а то и меньше. ВЧ-резонанс сопротивления провода объясняется эффектом

длинной линии лишь с натяжкой. Это граница рассмотрения провода как цепи с сосредоточенными параметрами.

Для одновиткового дросселя с проводом длиной 38 см наблюдается ВЧ-резонанс комплексного сопротивления (рис. 13) на частоте  $1,8 \cdot 10^8$  Гц, близкой к резонансной частоте комплексного сопротивления отдельного провода  $1,98 \cdot 10^8$  Гц. Кроме того, значение емкости  $C_R$  в схеме замещения дросселя (рис. 16) совпадает со значением емкости  $C_R$  в схеме замещения провода (рис. 9). Это означает, что в формулу (12) надо вставлять не диэлектрическую и магнитную проницаемости материала сердечника, а  $\epsilon$  и  $\mu$  окружающей среды (воздуха). Получается, что сердечник не влияет на электромагнитное поле, создаваемое проводом, а оказывает влияние только на электромагнитное поле, создаваемое витками провода. Емкость  $C_R$  в схеме замещения дросселя – это емкость  $C_R$  в схеме замещения провода (2,5 пФ для 38 см и 0,8 пФ для 6 см). Таким образом, ВЧ-резонанс сопротивления дросселя можно объяснить эффектом длинной линии тоже лишь с большой натяжкой. В [1] данный ВЧ-резонанс объяснялся эффектом длинной линии, так как в выражение (12) подставляли  $\epsilon$  и  $\mu$  сердечника, что, как было показано выше, некорректно.

На рис. 21 представлены зависимости индуктивности провода  $L_w$  и емкости провода  $C_R$ , определенные из измеренных частотных характеристик комплексного сопротивления провода. Измерения проводились при различных длинах провода (6 см, 21 см, 38 см, 69 см) и соответствующим им количестве витков дросселя (1, 3, 7, 14). На рис. 21а: кривая 1 соответствует индуктивности провода, рассчитанной по формуле (7), кривая 2 – измеренной индуктивности провода, кривая 3 – расчетное значение индуктивности провода с учетом взаимной индуктивности разных кусков провода (провод представляет плоскую петлю – рис. 7). Согласно [10] два параллельных провода длиной  $l$ , расстояние между которыми  $h$ , при протекании через них тока образуют взаимную индуктивность, равную

$$M_w = 0,2 \cdot l \left( \ln \left( \frac{l + \sqrt{l^2 + h^2}}{h} \right) - \frac{\sqrt{l^2 + h^2}}{l} + \frac{h}{l} \right), \text{ мкГн.} \quad (13)$$

В качестве  $l$  была взята половина длины провода, а в качестве  $h$  было взято 1,3 см (чуть больше высоты контейнера – 12,5 мм). Учет взаимной индуктивности двух кусков провода дает неплохое совпадение расчетного

значения индуктивности провода и измеренного (рис. 21,а). Данные кривые приведены, чтобы показать необходимость более подробно исследовать индуктивность провода в дросселе.

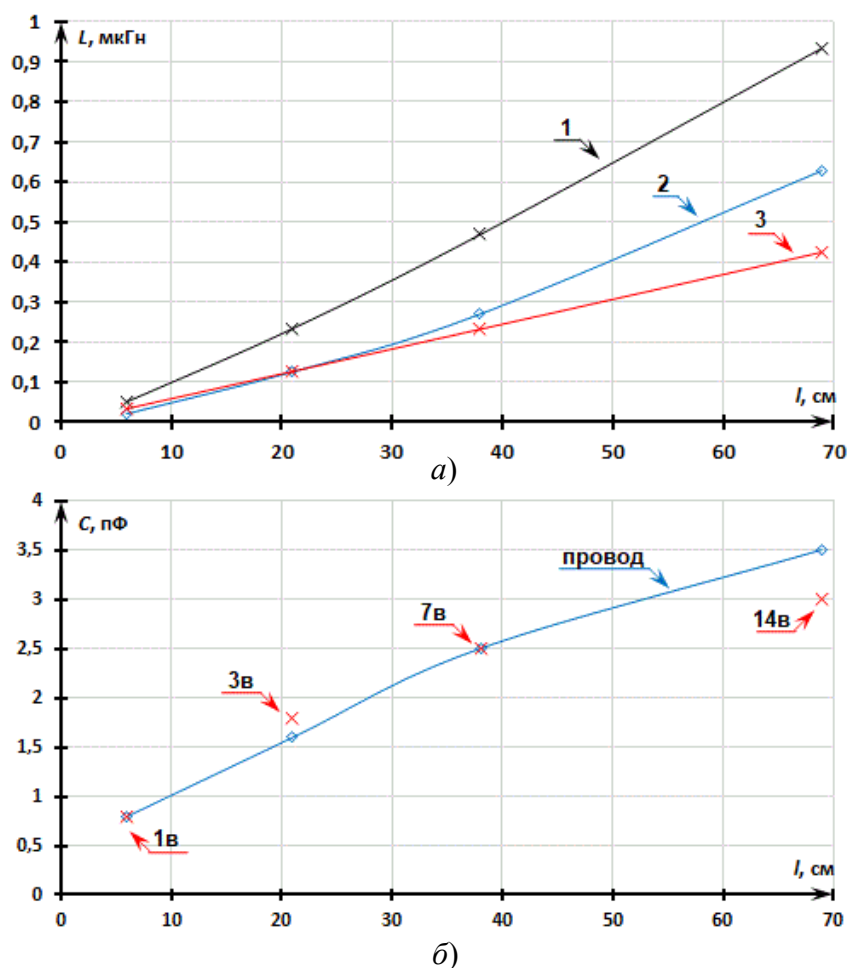


Рис. 21: а) значение  $L_w$ , рассчитанное по (7) – «1», полученное из измеренного комплексного сопротивления провода – «2» и рассчитанное используя (7) и (13) – «3»; б) значения  $C_R$ , полученные из измеренных комплексных сопротивлений провода различной длины (6 – 69 см) и дросселя с различным количеством витков (1, 3, 7, 14)

Из рис. 21,б видно, что увеличение длины провода приводит к увеличению емкости дросселя, и что емкость провода практически соответствует емкости дросселя. Получается, что межвитковая емкость здесь не причем – влияют только размеры катушки. Чем больше длина провода, тем больше его емкость, причем зависимость практически логарифмическая. Для более подробного определения зависимости этой емкости от длины провода, количества витков, способа намотки (однослойная, многослойная, секционная) требуются исследования.



**Причина ВЧ-всплесков (участки 5, 6 на рис. 3).** Попробуем понять причину возникновения этой емкости в схеме замещения дросселя. При протекании переменного тока в проводнике всегда образуются: тепло, переменное магнитное поле и переменное электрическое поле. В случае преобладания теплового действия тока имеем только резистор в качестве провода (низкие частоты, до 1 кГц – рис. 8), при преобладании магнитного поля – провод представляет из себя идеальную индуктивность (100 кГц – 100 МГц для провода длиной 38 см – рис. 8), после 180 МГц (для провода длиной 38 см – рис. 8) преобладает действие электрического поля.

Электрическое поле вокруг провода имеется всегда при протекании переменного электрического тока. Наличие его в проводе создает скин-эффект, выталкивающий заряды из проводника. Оценить это электрическое поле можно только на высоких частотах, когда энергия электрического поля будет соизмерима с энергией магнитного поля. Если есть энергия электрического поля, то возникает емкость в схеме замещения провода. Этот эффект возникновения емкости в схеме замещения провода дуален эффекту возникновению индуктивности в схеме замещения диэлектрика, описанному в [14]: электрическое поле заменяется на магнитное поле.

В [14] было объяснено, что дальнейшие ВЧ-резонансы в комплексном сопротивлении диэлектрика (рис. 22) не связаны с эффектом длинных линий (геометрические размеры диэлектрика были достаточно малы), а возникают из-за наличия двух магнитных потоков (собственный и отраженный), которые влияют друг на друга, как в случае с трансформатором. Происходят переотражения магнитных потоков диэлектрика, которые создают всплески комплексного сопротивления диэлектрика. Кроме того, при этих всплесках комплексного сопротивления диэлектрика фаза меняется не на  $180^\circ$  (значительно меньше) – не происходит смена действия магнитного и электрических полей. Это также может быть объяснением того, что здесь не эффект длинных линий, а влияние электрического поля, но с преобладанием магнитного поля.

По аналогии с последующими ВЧ-резонансами в комплексном сопротивлении диэлектрика (рис. 22), последующие ВЧ-резонансы в комплексном сопротивлении провода тоже не могут быть объяснены с помощью эффекта длинных линий, т.к. длина предложенной длинной линии (рис. 20) значительно меньше длины волны, и фаза комплексного сопротивления при этих резонансах не меняется на  $180^\circ$  (рис. 8). Таким

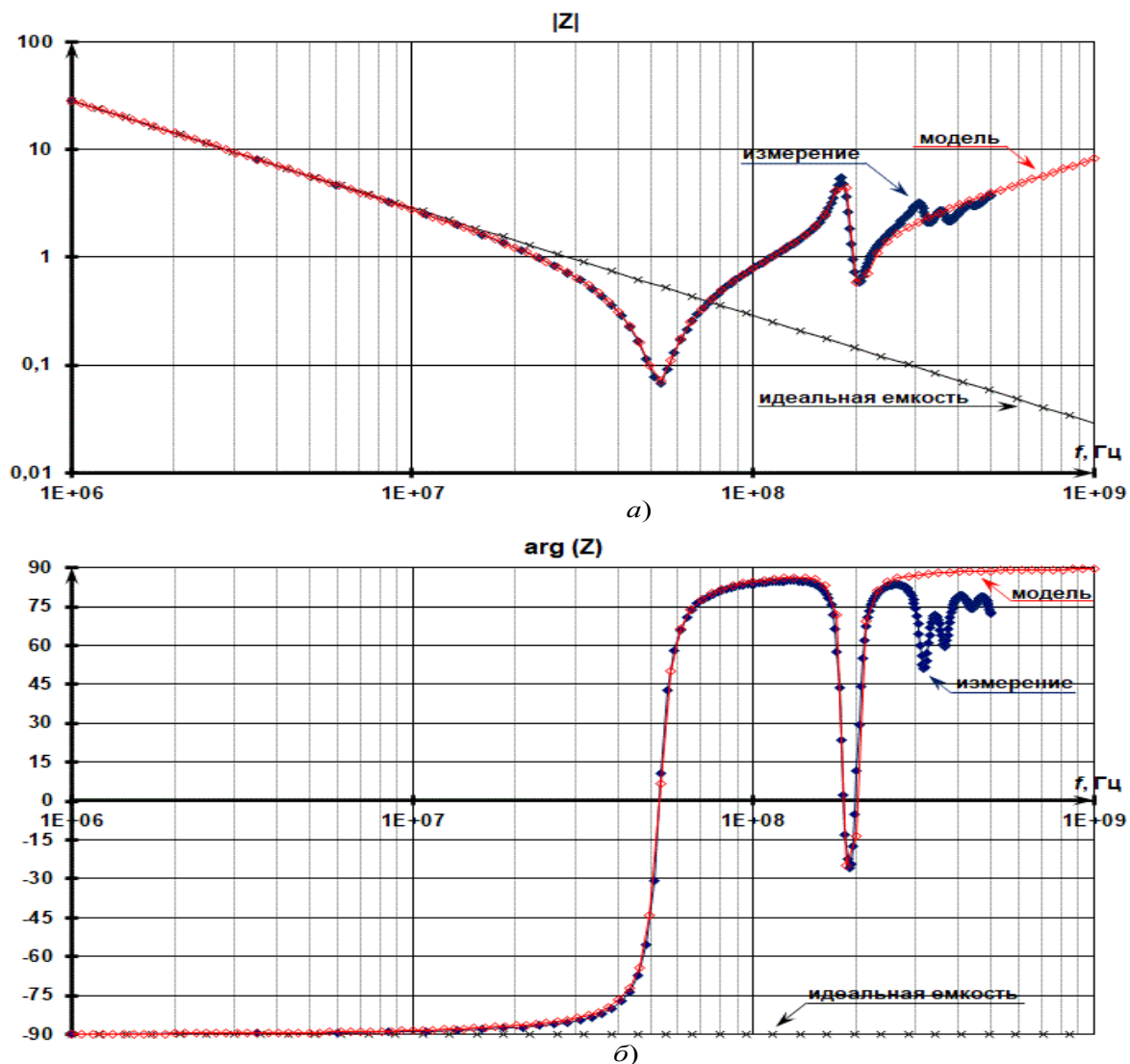


Рис. 22. Модуль (а) и фаза (б) комплексного сопротивления измеренного диэлектрика Н90 9250 и его схемы замещения (взято из [14])

образом, также получаем случай дуальности комплексных сопротивлений провода и диэлектрика – происходят переотражения электрического поля на разных участках провода, что и создает всплески комплексного сопротивления провода. Лишь на частоте более 1 ГГц провод длиной 38 см можно, скорее всего, считать длинной линией (рис. 20), так как теперь в длину этой линии (15 – 19 см) должна укладываться половина длины волны колебания ( $\lambda = 30$  см).

## Выводы

1. Реализована электрическая структурно-параметрическая схема замещения дросселя (рис. 16) с нанокристаллическим кольцевым сердечником MSFN-25S-TH. Частотные характеристики схемы близки к измеренным частотным характеристикам сопротивления дросселя на частотах до 500 МГц. Это позволяет использовать схему замещения дросселя для проектирования высокочастотных фильтров радиопомех.

2. Предложено разделить учет влияния провода и сердечника на комплексное сопротивление дросселя в схеме замещения, что позволило использовать эту схему при любом числе витков обмотки и проводе обмотки, любой форме и типе сердечника, а также лучше понять протекающие процессы: найти комплексную магнитную проницаемость материала сердечника, отдельно рассмотреть влияние провода и сердечника на комплексное сопротивление дросселя. Разделение учета влияния провода и сердечника позволяет использовать предложенную схему замещения дросселя для различных сердечников, не обладающих собственной резонансной частотой (нанокристаллические и аморфные сплавы с различной проницаемостью, мо-пермаллой и другие магнитодиэлектрики). Синтезированную схему замещения дросселя учетом межвитковой связи, индуктивности рассеивания и т.д. можно модифицировать для двух-, трехобмоточного дросселя и трансформатора.

3. Установлено принципиальное отличие работы нанокристаллического сердечника от ферритового в ВЧ-фильтрах. Отсутствует характерный для ферритов резонанс на частотах 0,5–2 МГц, имеет место «поглощение ВЧ помехи» в отличие от характерного для ферритов отражения помехи, что связано со сменой индуктивного характера ферритового дросселя на емкостный, и может создавать проблемы в работе импульсного преобразователя напряжения.

4. Показано, что для построения схемы замещения (структуры и параметров) измерения только модуля сопротивления дросселя недостаточно, необходимо измерять также фазу его комплексного сопротивления.

5. Рассмотрена возможность определения индуктивности провода, используя (7) и (13). Аргументируется несостоятельность использования понятия межвитковой емкости для определения собственной емкости

дросселя. Замечено, что емкость провода практически соответствует емкости дросселя.

6. Аргументирована несостоятельность использования длинной линии в схеме замещения дросселя. Даны объяснения собственной емкости провода и дросселя, которая создает резонансы при экспериментальном измерении комплексных сопротивлений.

### Список литературы

1. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Эквивалентная схема замещения дросселя, намотанного на феррите, в широком диапазоне частот (0 Гц – 500 МГц) // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2021.– Т. 24, №4.– С. 25–45.

2. Cuellar C. HF Characterization and Modeling of Magnetic Materials for the Passive Components Used in EMI Filters / PhD Doctoral, Electrical Engineering, University of Lille 1, Lille – France, 2013. 2010 с. URL: <https://pepite-depot.univ-lille.fr/LIBRE/EDSPI/2013/50376-2013-Cuellar.pdf>

3. Cuellar C., Idir N., Benabou A. High Frequency Behavioral Ring Core Inductor Model // IEEE Transactions on Power Electronics.– 2016.– Vol. 31, Issue 5 (May).– С. 3763–3772.

4. Дмитриков В.Ф., Фрид Л.Е., Кушнерев Д.Н., Чмутин Д.С. Синтез эквивалентных частотных схем замещения дросселя // Практическая силовая электроника.– 2017.– №2.– Вып. 66.– С. 5–11.

5. Dmitrikov V.F., Frid L.E., Belyaev A.E., Petrochenko A.Y., Zaytseva Z.V. Synthesis of Equivalent Circuits for Chokes and Capacitors in a Wide Range of Frequencies Taking into Account Dynamic Processes in Dielectric and Magnetic Materials // 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM-2019).– Novosibirsk State Technical University, IEEE Russia Siberia Section.– 2019.– С. 532–540.

6. Дмитриков В.Ф., Исаев В.М., Куневич А.В. Разработка поведенческих моделей конденсаторов и дросселей с учетом частотных свойств диэлектрической и магнитной проницаемости диэлектриков и магнетиков // Наноиндустрия.– 2020.– Т. 13.– № S4 (99).– С. 372–373.

7. Дмитриков В.Ф., Петроченко А.Ю., Фрид Л.Е., Беляев А.Е., Зайцева З.В. Разработка высокочастотных электрических схем замещения конденсаторов и дросселей с учетом частотных свойств диэлектрической и

магнитной проницаемости диэлектриков и магнетиков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы.– 2020.– Т. 23.– №2.– С. 55–69.

8. Kotny J.-L., Margueron X., and Idir N. High-Frequency Model of the Coupled Inductors Used in EMI Filters // IEEE Transactions on Power Electronics.– 2012.– Vol. 27, no. 6 (June).– С. 2805–2812.

9. Немцов М.В., Шамаев Ю.М. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности / М.: Энергоиздат, 1981.– 136 с.

10. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга / 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.– 488 с.

11. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах.– М.–Л.: Главная редакция энергетической литературы, 1936.– 303 с.

12. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов.– Екатеринбург: Изд-во Уральского ин-та, 2002.– 384 с.

13. Филиппов Б.Н., Жаков С.В. Теории динамических свойств ферромагнитных монокристалльных пластин, обладающих доменной структурой // Физика металлов и металловедение.– 1975.– Т. 39, №4.

14. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Эквивалентная схема замещения диэлектрика в широком диапазоне частот (0 Гц – 500 МГц) // В настоящем сборнике.

**Дмитриков Владимир Федорович** – Заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор кафедры теоретических основ телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. E-mail: [Dmitrikov\\_VF@mail.ru](mailto:Dmitrikov_VF@mail.ru).

**Шушпанов Дмитрий Викторович** – к.т.н., доцент кафедры теоретических основ телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. E-mail: [dimasf@inbox.ru](mailto:dimasf@inbox.ru).

**Фоченков Эдуард Анатольевич** – начальник БМА ПАО «Мстатор» (г. Боровичи, Новгородская область). E-mail: [abc2202@gmail.com](mailto:abc2202@gmail.com).

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

# СИНТЕЗ, АНАЛИЗ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ

Международный сборник научных трудов

Вып. 17

Подготовлен из докладов  
Четвертой международной конференции  
«Синтез, анализ и диагностика электронных цепей»  
(Ульяновск, 23–26 мая 2022 года)

Ульяновск  
УлГТУ  
2022



*Научное электронное издание*

**СИНТЕЗ, АНАЛИЗ И ДИАГНОСТИКА  
ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ**

Международный сборник научных трудов  
Выпуск 17

Под редакцией В. В. Филаретова

Компьютерная верстка В. В. Филаретов

ЛР № 020640 от 22.10.97.

Дата подписания к использованию 08.11.2022.  
ЭИ № 1736. Объем данных 7,8 Мб. Заказ № 495.

Ульяновский государственный технический университет  
432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.  
ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, Ульяновск, Сев. Венец, 32.

Тел.: (8422) 778-113  
E-mail: [venec@ulstu.ru](mailto:venec@ulstu.ru)  
[venec.ulstu.ru](http://venec.ulstu.ru)