

Особенности проектирования сетевых фильтров радиопомех в широком диапазоне частот с учетом эквивалентных схем замещения конденсаторов и дросселей

В.Ф. Дмитриков¹, А.Ю. Петроченко², В.М. Исаев³, Д.В. Шушпанов¹

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 АО «Российская электроника»
121357, Россия, г. Москва,
ул. Вере́йская, 29, стр. 141

Аннотация – На основании феноменологических уравнений, описывающих динамические процессы намагничивания ферромагнетиков дросселей и поляризации диэлектриков конденсаторов с учетом комплексных частотно-зависимых диэлектрических проницаемостей $\varepsilon(j\omega)$ диэлектриков конденсаторов и магнитных проницаемостей $\mu(j\omega)$ сердечников дросселей, получены эквивалентные электрические структурно-параметрические схемы замещения конденсаторов и дросселей. Установлена связь паразитных элементов эквивалентных электрических схем замещения конденсаторов и дросселей с электрофизическими характеристиками материала диэлектрика конденсатора и сердечника дросселя, определяющие их частотные свойства, структуру и параметры элементов схемы замещения. Рассмотрены особенности проектирования сетевых фильтров радиопомех с учетом паразитных параметров дросселей и конденсаторов фильтров радиопомех, найденных в результате проведенного синтеза эквивалентных электрических схем замещения дросселей и конденсаторов в широком диапазоне частот 150 кГц – 30 МГц.

Ключевые слова – диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, фильтр радиопомех, поведенческая модель.

Введение

При проектировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) разработчикам необходимо знать частотные характеристики импедансов (комплексные сопротивления) конденсаторов и дросселей и их точные высокочастотные эквивалентные электрические структурно-параметрические схемы замещения (поведенческие модели) в широком диапазоне частот до 100 МГц и выше, хорошо адаптируемые к современным вычислительным программам схемотехнического моделирования.

Поводом для обращения авторов к этой теме послужил государственный контракт на выполнение ОКР «Источник-И17-РК» (государственная программа РФ «Развитие оборонного комплекса»). Данная ОКР вызвана импортозамещением модулей фильтров электромагнитных помех (ФРП) с функциями защиты потребителя от перенапряжений, предназначенных для использования во входных и выходных цепях преобразователей DC/DC, выпускаемых фирмой Vicor (США), и модулей пассивных ФРП также с функциями защиты от

перенапряжений, предназначенных для использования во входных цепях преобразователей AC/DC, выпускаемых фирмой Epcos (Германия). Данные ФРП широко используются в источниках вторичного электропитания радиоэлектронной аппаратуры для вооружения и военной техники.

В каждой стране используются десятки-сотни миллионов источников питания в различных электронных устройствах и системах, а в них обязательным устройством являются силовые сглаживающие фильтры и ФРП, неотъемлемая часть которых конденсаторы и дроссели.

И наконец, просто конденсаторы и дроссели являются неотъемлемой частью большинства устройств и систем РЭА, поэтому рассмотрение и решение данной проблемы становится актуальной задачей.

Динамические процессы в сердечниках дросселей и в диэлектриках конденсаторов могут быть описаны феноменологическими уравнениями (1) и (2) [1–4]:

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

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

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 [5–7] 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 пьезоэлектриков. С использованием уравнений (1) и (2) в [2–4] получены выражения для комплексных сопротивлений $Z_L(p)$ сердечников и $Z_C(p)$ диэлектриков соответственно (3), (4):

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

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

где

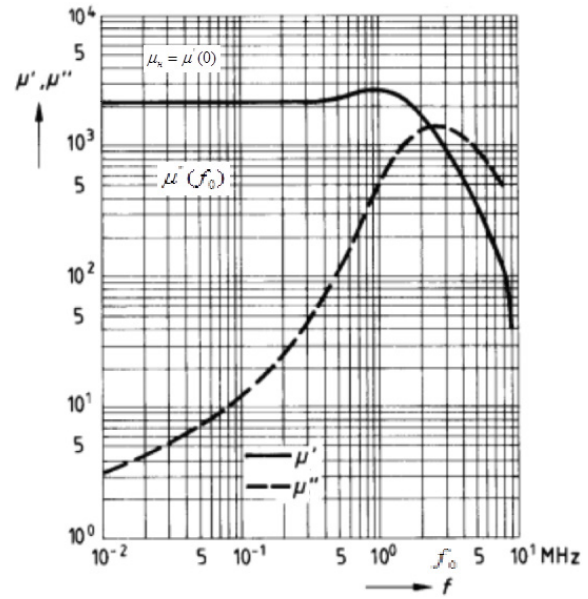
$$T_0 = \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{1}{\omega_0}$$

– постоянная времени колебательного процесса доменных структур, ω_0 – круговая частота,

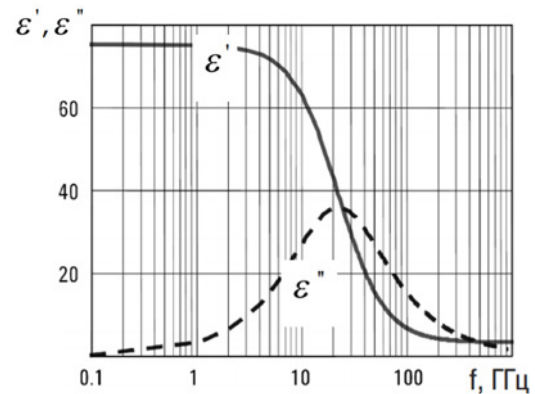
$$\xi = \frac{1}{2} \frac{\beta}{\sqrt{km}}$$

– коэффициент затухания, 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 диэлектриков конденсаторов и сердечников дросселей. Значения коэффициентов T_0 , ξ определяются либо вторичными параметрами материала сердечников и диэлектриков (магнитной и диэлектрической проницаемостью $\mu(j\omega)$ и $\varepsilon(j\omega)$), либо первичными параметрами материала



a



б

Рис. 1. Частотные зависимости вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости
Fig. 1. Frequency dependences of the real and imaginary parts of the complex dielectric and magnetic permeability

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

Частотные зависимости комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей приведены на рис. 1.

Нелинейный характер зависимости вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической и магнитной проницаемости показывает наличие емкостной и индуктивной составляющих соответственно в импедансе диэлектриков и ферромагнетиков.

Из полученных выражений (3), (4) видно, что $Z_L(p)$ и $Z_C(p)$ являются дробно-рациональными функциями с положительными вещественными коэффициентами, следовательно, эти сопротивления удовлетворяют критерию физической реализуемости электрическими двухполюсниками,

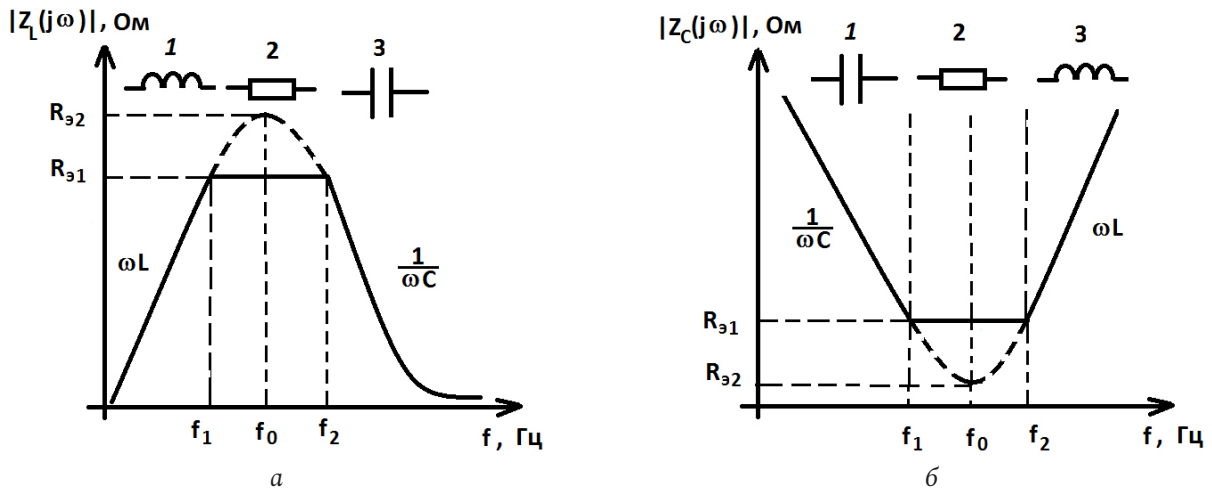


Рис. 2. ЛАЧХ: а – $|Z_L(j\omega)|$; б – $|Z_C(j\omega)|$
 Fig. 2. Log magnitude: а – $|Z_L(j\omega)|$; б – $|Z_C(j\omega)|$

составленными из сосредоточенных элементов типа R , L , C . Сопротивлению $Z_L(p)$ может быть поставлен во взаимно однозначное соответствие двухполюсник в виде параллельного колебательного контура, а сопротивлению $Z_C(p)$ – в виде последовательного колебательного контура.

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

Производители конденсаторов обычно приводят частотные характеристики модуля сопротивления конденсатора $|Z_C(j\omega)|$. По частотным характеристикам $|Z_C(j\omega)|$ также могут быть определены значения T_0 и ξ , а следовательно, и параметры L_Θ , C_Θ , R_Θ эквивалентной электрической схемы, но только не диэлектрика, а конденсатора. При использовании модуля сопротивлений конденсаторов $|Z_C(j\omega)|$ параметры T_0 и ξ будут определяться и свойствами материала диэлектрика, и конструкцией конденсатора.

Параметры L_Θ , C_Θ , R_Θ , T_0 , ξ могут быть определены из представленных на плоскости логарифмических характеристик $|Z_L(j\omega)|$ и $|Z_C(j\omega)|$ (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 $|Z_L(j\omega)|$ – резистивный характер, а в зоне III – емкостный характер. Для конденсатора (рис. 2, б), в свою очередь, в зоне I – емкостный, в зоне II – резистивный, а в зоне III – индуктивный характер. Частотные характеристики $|Z_L(j\omega)|$ и $|Z_C(j\omega)|$ существенным образом зависят от коэффициента затухания

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{\beta}{\sqrt{km}} = \frac{1}{2} \frac{\mu'(0)}{\mu''(\omega_0)},$$

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

$$T_0 = \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{1}{\omega_0}$$

следует, что резонансная частота зависит от массы колеблющихся частиц (доменов): чем крупнее домены, тем ниже резонансная частота и больше паразитные элементы.

Формулы для расчета элементов (L_Θ , C_Θ , R_Θ) эквивалентных электрических схем через электрофизические характеристики материалов m , β , k или через характеристики, определяющие частотные свойства материалов T_0 , ξ , сведены в таблице.

1. 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 конденсатора К10-82п Н20 производились прибором – анализатором импеданса Keysight Е4990А в диапазоне частот от 1 МГц до 500 МГц.

Сопоставление полученных теоретических расчетов и экспериментально измеренных характеристик ЛАЧХ $|Z_C(j\omega)|$ для конденсатора К10-82п Н20 (рис. 4) и ЛАЧХ $|Z_L(j\omega)|$ для дросселя с материалом сердечников ГМ414 (рис. 3) позволяет сделать

Таблица. Формулы соответствия параметров материала диэлектриков и сердечников конденсаторов и дросселей T_0 , ξ , L , C и параметров $L_{\text{Э}}$, $C_{\text{Э}}$, $R_{\text{Э}}$ схем замещения сердечника дросселя и диэлектрика конденсатора
Table. Formulas of correspondence of the parameters of the material of dielectrics and cores of condensates and chokes T_0 , ξ , L , C and parameters $L_{\text{Э}}$, $C_{\text{Э}}$, $R_{\text{Э}}$ of equivalent circuits of the choke and the dielectric of the capacitor

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

Примечание: $\mu'(0)$, $\varepsilon'(0)$ – значение действительной (вещественной) составляющей магнитной и диэлектрической проницаемостей сердечника дросселя и диэлектрика конденсатора на частоте $\omega = 0$. $\mu''(\omega_0)$, $\varepsilon''(\omega_0)$ – значение реактивной (мнимой) составляющих $\mu(j\omega)$ и $\varepsilon(j\omega)$ на частоте, где $\mu'(\omega)$, $\varepsilon'(\omega)$ равны нулю [2–4].

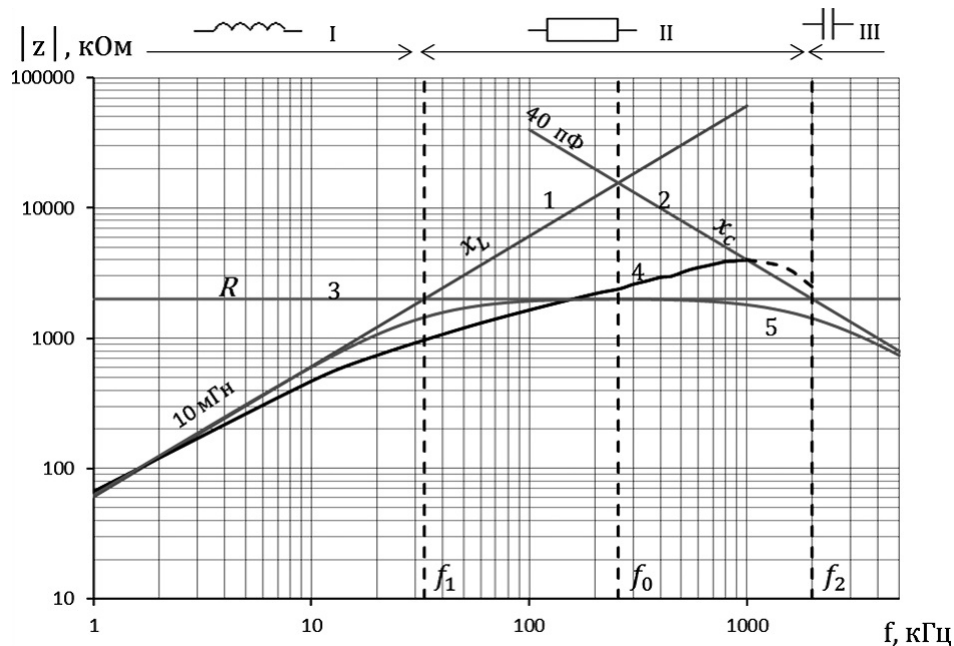


Рис. 3. Модуль сопротивления $|Z_L(j\omega)|$ для сердечника ГМ414 $N = 10$ витков, кривая 4 – эксперимент, кривая 5 – теоретический расчет

Fig. 3. Resistance modulus $|Z_L(j\omega)|$ for the GM414 core $N = 10$ turns, curve 4 – experiment, curve 5 – theoretical calculation

вывод о совпадении результатов теоретических исследований и экспериментальных измерений.

2. Модель ФРП для симметричных и несимметричных помех

На рис. 5 представлена схема ФРП для сети постоянного тока. Фильтр радиопомех включает элементы для фильтрации как симметричных

(дифференциальных), так и несимметричных (синфазных) помех.

Дроссель подавления несимметричных помех L содержит две идентичные обмотки на одном сердечнике с высокой магнитной проницаемостью. Обмотки выполнены таким образом, что протекающие через них токи создают магнитные потоки, компенсирующие друг друга. Полярность вклю-

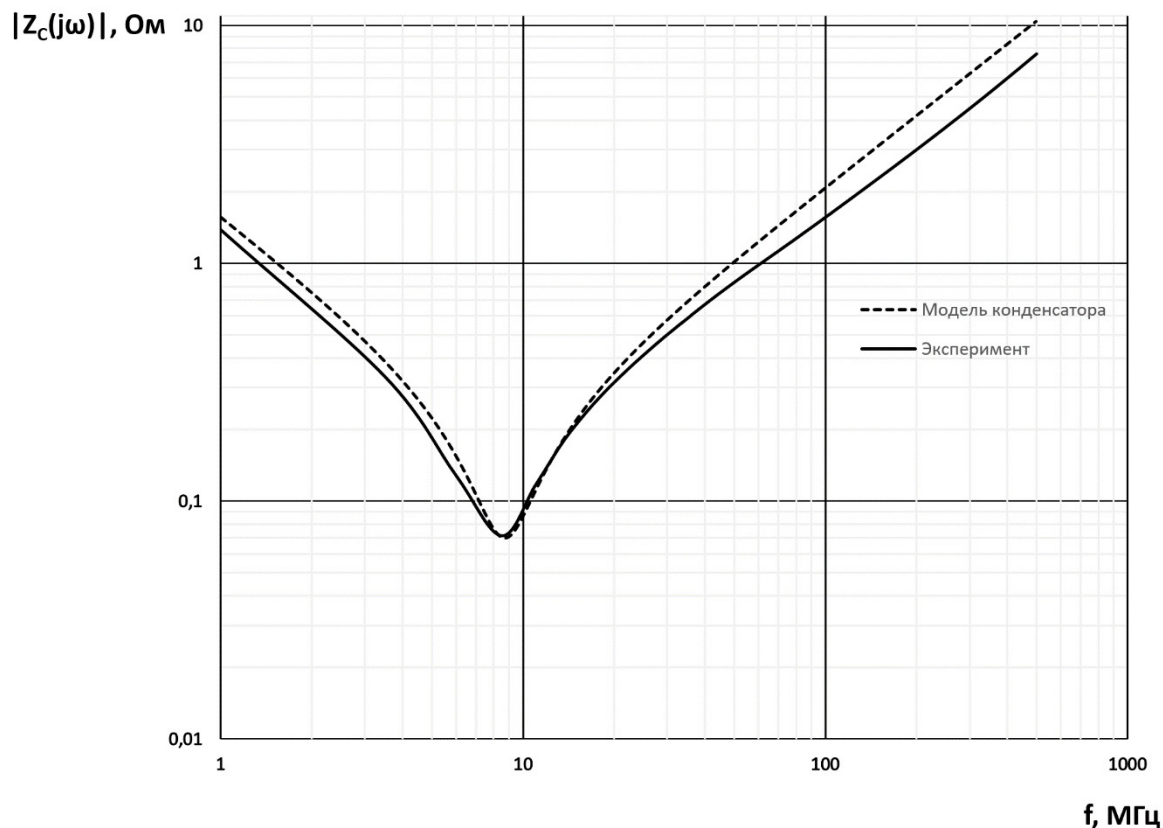


Рис. 4. Модуль сопротивления $|Z_C(j\omega)|$ для конденсатора К10-82н Н20. Модель ФРП для симметричных и несимметричных помех
 Fig. 4. Resistance module $|Z_C(j\omega)|$ for capacitor К10-82н Н20. FRP model for symmetrical and unsymmetrical interference

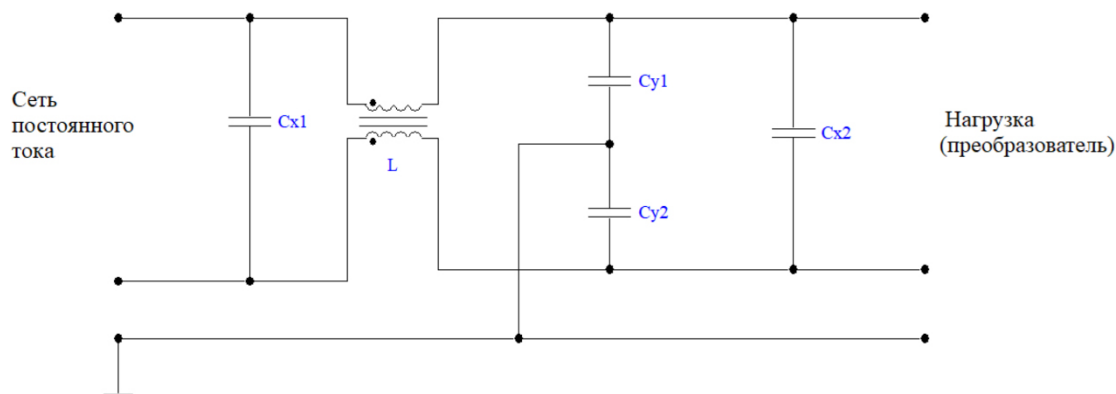


Рис. 5. Схема ФРП для сети постоянного тока
 Fig. 5. FRP circuit for a direct current network

чения индуктивно связанных обмоток такова, что для несимметричных помех, распространяющихся по цепи провод – земля, они имеют согласное включение и, следовательно, большое индуктивное сопротивление. Для симметричных помех, распространяющихся по сетевым проводам, они имеют встречное включение, а индуктивность сопротивления будет определяться индуктивностями рассеяния обмоток L_S . Обычно индуктивности рассеивания приблизительно равны 1–2 % от индуктивности дросселя. Отсутствие намагничивания сердечника дросселя от протекания рабочего

тока по сетевым проводам позволяет реализовать большую индуктивность – несколько мГн без насыщения сердечника с большой магнитной проницаемостью при протекании рабочего тока промышленной частоты или постоянного тока. Конденсаторы $C_{X1} = C_{X2} = C_X$, включенные между проводами сети, осуществляют фильтрацию помех симметричного вида, которые распространяются по сетевым проводам. Любой из конденсаторов C_{X1} или C_{X2} может отсутствовать в зависимости от полного сопротивления сети или источника питания, если их сопротивления окажутся слиш-

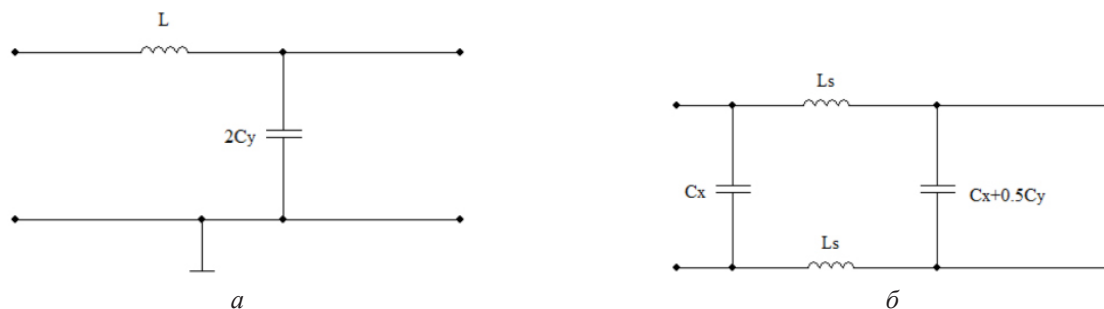


Рис. 6. Схема фильтра радиопомех для несимметричных и симметричных помех
Fig. 6. Scheme of the radio interference filter for symmetrical and unsymmetrical interference

ком низкими для использования конденсаторов. Конденсаторы $C_{Y1} = C_{Y2} = C_Y$, включенные между сетевыми проводами и шиной заземления, ослабляют несимметричные помехи. Если C_X велико, то C_Y не оказывает влияния на симметричные помехи. Следует отметить, что в сетях постоянного тока нет ограничения на величину емкости C_Y , как в сетях переменного тока, в связи с безопасностью обслуживающего данное устройство персонала [8; 9].

На рис. 6 представлены эквивалентные схемы для помех несимметричного и симметричного вида, которые соответствуют фильтру, приведенному на рис. 5.

В нижней части защищаемого диапазона частот паразитными параметрами элементов ФРП и монтажа можно пренебречь. Поэтому вносимое затухание ФРП (A , дБ) на нижней частоте защищаемого диапазона f_H для рассматриваемого в качестве примера Г-образного фильтра определяется по формуле

$$A = 20 \lg(L_f C_f f_H 4\pi^2). \quad (5)$$

В верхней части защищаемого диапазона паразитные параметры элементов ФРП существенно влияют на частотную характеристику ослабления помех фильтром. С учетом паразитных параметров характеристика ослабления помех имеет вид характеристики режекторного фильтра с ограниченной полосой эффективного ослабления.

Для исследования характеристики ослабления с учетом паразитных параметров целесообразно его моделирование осуществлять с использованием одной из программ схемотехнического анализа электронных схем [10]. При этом элементы ФРП представляются поведенческими моделями (эквивалентными схемами замещения). Для дросселя ФРП это параллельный контур с учетом паразитных сопротивлений R_L и емкостей C_L , а для емкости это последовательный контур с добавлением паразитных сопротивлений R_C и индуктивности

L_C [9; 11; 12]. Следует отметить, что представленные поведенческие модели конденсаторов и дросселей ФРП с учетом их паразитных параметров в виде последовательных и параллельных контуров являются достаточно грубым приближением реальных схем замещения и могут использоваться в диапазоне частот до 30 МГц. В диапазонах частот до 100 МГц и выше поведенческие модели конденсатора и дросселя существенно усложняются.

На рис. 7 приведена схема ФРП для ослабления симметричных помех. Здесь $L2, R2; L8, R8$ – паразитные параметры соединительных проводов, а $L10, R13; L1, R12$ – паразитные параметры провода заземления. Схемы замещения катушек индуктивности представлены параллельным RLC-контуром, а схемы замещения конденсаторов – последовательным RLC-контуром. Полное сопротивление эквивалента сети моделируется резистором $R1$, а полное внутреннее сопротивление источника питания – резистором $R11$.

Для рассматриваемого фильтра на частоте $f_H = 150$ кГц затухание для несимметричных помех составляет $A_{НЕС} > 50$ дБ, для симметричных – $A_{СИМ} > 40$ дБ. С ростом частотного диапазона в высокочастотной части защищаемого диапазона ослабления помех ФРП снижается.

3. Влияние паразитных параметров конденсаторов, дросселей и проводов заземления на частотные характеристики ослабления ФРП

Основная проблема и сложность разработки и изготовления ФРП с оптимальными параметрами по ослаблению ЭМП, массогабаритным характеристикам, устойчивости работы системы ФРП – преобразователь напряжения состоит в том, что, в отличие от ведущих зарубежных производителей конденсаторов и магнитных сердечников, ни одна из отечественных фирм не представляет разработчикам аппаратуры поведенческих моделей

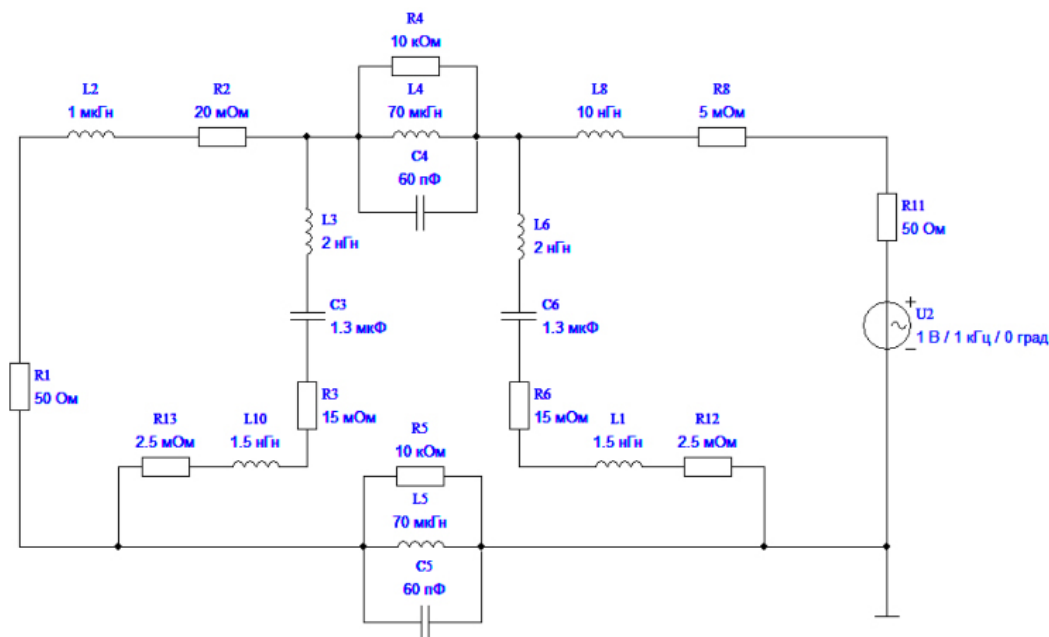


Рис. 7. Модель ФРП для симметричных помех с учетом паразитных параметров дросселей, конденсаторов, проводов заземления, эквивалентных схем сети и ИПН
 Fig. 7. Model of FRP for symmetric interference, taking into account the parasitic parameters of chokes, capacitors, ground wires, network equivalent circuits and IIT

(эквивалентные схемы замещения) конденсаторов и дросселей. В свою очередь отечественные производители ИВЭП не предоставляют частотно зависимое входное сопротивление импульсных преобразователей напряжения. Входное сопротивление стабилизированных импульсных преобразователей имеет комплексный характер: положительную мнимую составляющую и отрицательную вещественную активную составляющую. Такой характер входного сопротивления ИПН делает потенциально неустойчивой систему ФРП – ИПН [9; 11]. Поэтому наряду с решением проблемы обеспечения сетевым ФРП требуемого ослабления симметричных и несимметричных помех требуется проектировать систему ФРП – ИПН, чтобы она оставалась устойчивой [9; 11].

Проблема устойчивости системы ФРП – ИПН исследовалась авторами достаточно подробно в монографии [9]. В данной статье ограничимся рассмотрением только электромагнитной совместимости, т. е. ослабления ФРП ЭМП в требуемом частотном диапазоне и на требуемую величину.

На рис. 8 и 9 приведены ЧХ ослабления симметричных помех, где цифрой «1» обозначены зависимости при паразитных параметрах дросселей, конденсаторов, соединительных проводов и проводов заземления, приведенных на модели (рис. 7). Здесь показаны очень оптимистичные паразитные параметры не только для отечественных,

но и для зарубежных дросселей и конденсаторов при указанных на схеме номиналах. При заданных паразитных параметрах дросселей L_{11} и L_{12} – это конденсаторы $C_7 = C_8 = 40$ пФ, а для конденсаторов C_3 и C_6 – это паразитные индуктивности $L_3 = L_6 = 2$ нГн. Ославление ЭМП фильтром в защищаемом диапазоне 150 кГц – 30 МГц составляет более 40 дБ. С увеличением паразитных емкостей C_7 и C_8 до 130 пФ и 400 пФ резонансные частоты характеристики ослабления сдвигаются в защищаемый диапазон, но величина ослабления ЭМП фильтром не уменьшается, а увеличивается на резонансных частотах. Это позволяет оптимистично подходить к выбору и изготовлению сердечника для L_{11} и L_{12} . Принципиально другой характер имеет характеристика ослабления помех фильтром при увеличении паразитных индуктивностей $L_3 = L_6$ фильтрующих емкостей C_3 и C_6 . При значении паразитной индуктивности $L_3 = L_6 = 8$ нГн ЧХ ослабления помех становятся меньше 40 дБ, т. е. не выполняются требования по подавлению помех, хотя резонансные частоты не изменились (рис. 9). Следует отметить, что на частоте 10 МГц паразитная индуктивность $L_3 = L_6 = 8$ нГн имеет сопротивление $X_L = 500$ мОм. С увеличением частоты сопротивление системы заземления увеличивается и уменьшается ослабление симметричных помех (рис. 9). Система заземления для ИВЭП с приемкой «5» должна иметь сопротивление не больше 2 мОм [12].

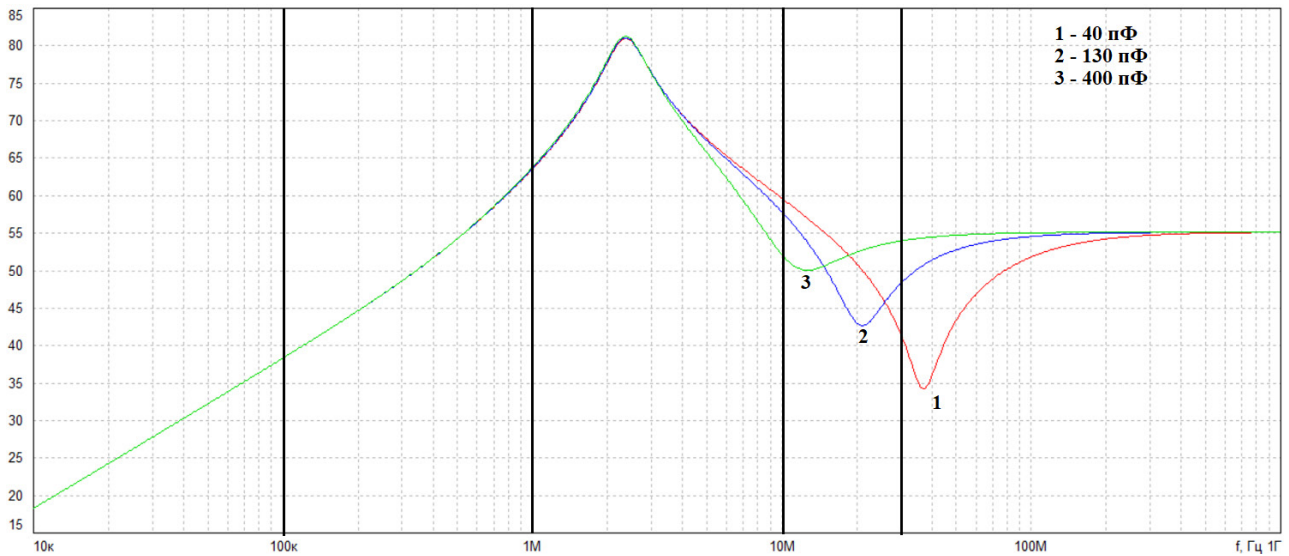


Рис. 8. Вносимое затухание симметричных помех при паразитных емкостях дросселя
 Fig. 8. Insertion loss of symmetrical interference with parasitic capacitances of the choke

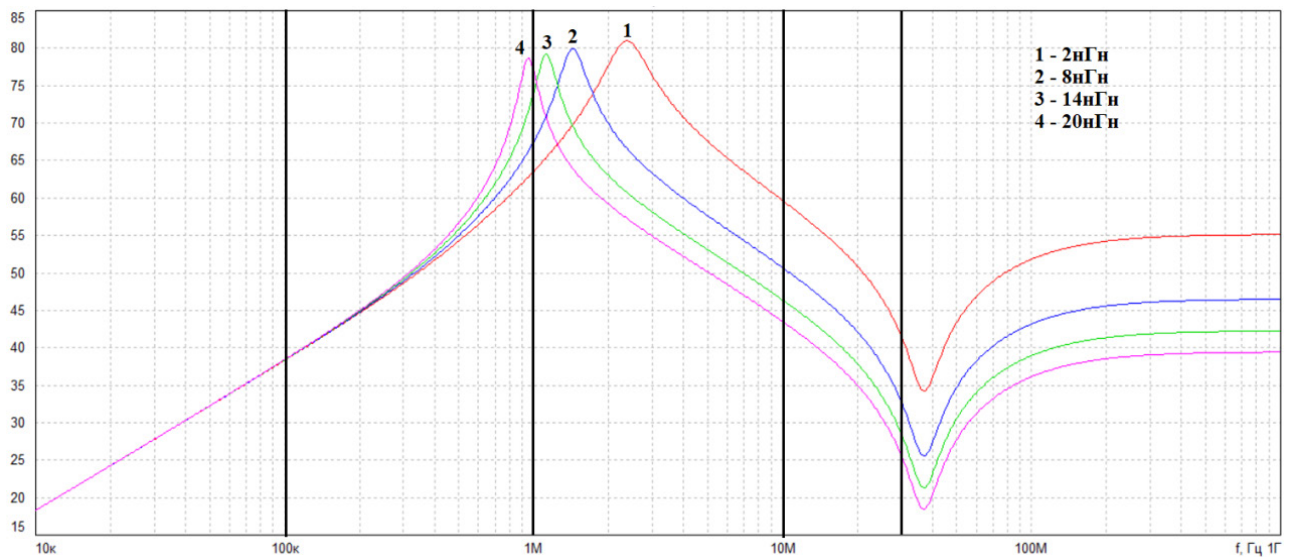


Рис. 9. Вносимое затухание симметричных помех при паразитных индуктивностях конденсаторов
 Fig. 9. Insertion loss of symmetrical noise at parasitic inductances of capacitors

Поскольку паразитная индуктивность конденсаторов для ослабления симметричных помех $C3 = C6$ соединяются последовательно с индуктивностями проводов заземления, то их негативное влияние на ухудшение ослабления помех проявляется дважды: во-первых, с ростом паразитных индуктивностей конденсаторов $C3 = C6$ ухудшаются фильтрующие свойства конденсаторов, а во-вторых, эта индуктивность входит в систему заземления и тем самым тоже ухудшает ослабление помех. Аналогично паразитная индуктивность проводов заземления $L1 = L10$, с одной стороны, являясь элементом цепи заземления и увеличивая ее сопротивление, ухудшает тем самым ослабление симметричных помех, а с другой стороны,

увеличивает сопротивление конденсатора, ухудшая тем самым его фильтрующие свойства, т. е. паразитная индуктивность проводов заземления тоже двояким образом ухудшает ослабление помех. Это требует, с одной стороны, выбора конденсаторов с очень малой паразитной индуктивностью, что, к сожалению, не всегда возможно, потому что необходимых конденсаторов может просто не существовать. С другой стороны, требуется минимизировать длину проводов заземления и увеличивать их диаметр.

Наибольшая чувствительность ЧХ ослабления ФРП симметричных и несимметричных помех в высокочастотной части (свыше одного МГц) защищаемого от ЭМП-диапазона обусловлена па-

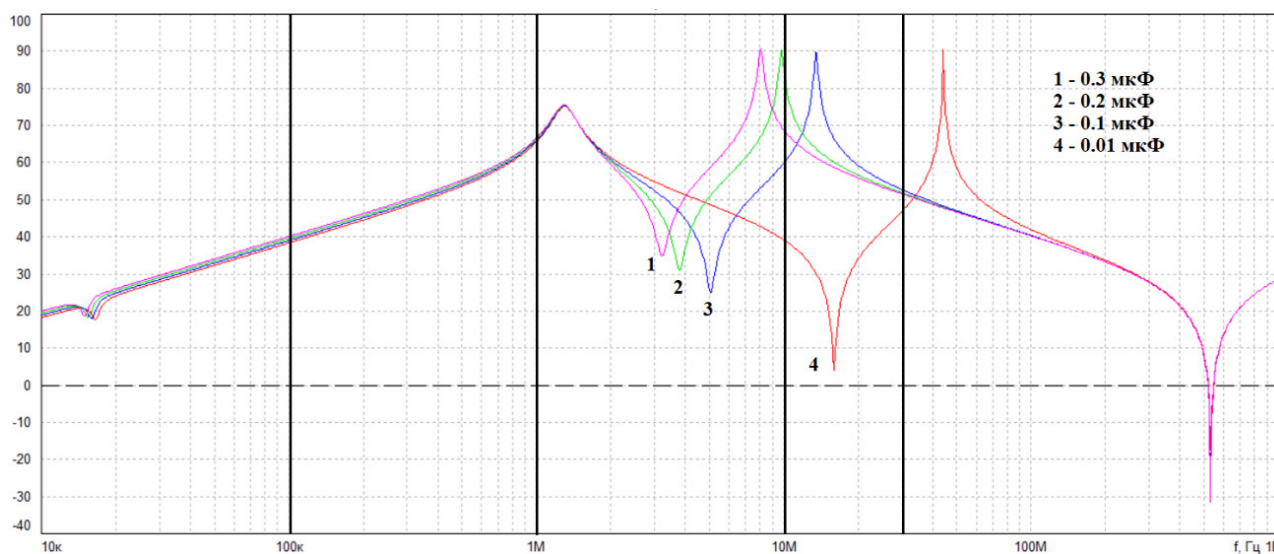


Рис. 10. ЧХ вносимого ФРП затухания симметричных помех при шунтировании конденсаторов $C_X = C_3 = C_6$ с паразитной индуктивностью $L = 10$ нГн высокочастотными конденсаторами
 Fig. 10. Frequency response of the attenuation of symmetric noise introduced by the FRP when shunting capacitors $C_X = C_3 = C_6$ with parasitic inductance $L = 10$ nH by high-frequency capacitors

разитной индуктивностью конденсаторов C_X и C_Y ФРП для подавления симметричных и несимметричных помех соответственно и индуктивностью проводов заземления. Для снижения индуктивности проводов заземления надо разрабатывать конструкцию ФРП с минимальной длиной и большей толщиной проводов заземления (не больше нескольких сантиметров длиной).

4. Влияние шунтирования высокочастотным конденсатором низкочастотного конденсатора на частотные характеристики ослабления помех

Для снижения негативного влияния паразитной индуктивности конденсаторов ФРП разработчики радиоэлектронной аппаратуры и производители конденсаторов, не имея возможности конструктивно или технологически уменьшить паразитную индуктивность конденсаторов C_X , пытаются уменьшить ее вредное влияние параллельным соединением сравнительно низкочастотного с достаточно большой паразитной индуктивностью и большим номиналом емкостей C_X и C_Y ФРП и более высокочастотного и на порядки с меньшими номиналами емкости и паразитными индуктивностями конденсатора.

Рассмотрим эффект от параллельного соединения сравнительно низкочастотных конденсаторов с большим номиналом емкостей, рассчитанных из условия обеспечения требуемого ослабления ЭМП на нижней частоте защищаемого диапазона,

и большими паразитными индуктивностями и высокочастотных с малыми номиналами (на порядки меньше) паразитных индуктивностей. Результатом такого соединения на высоких частотах несколько мегагерц и выше является эквивалентная схема из параллельного включения паразитной индуктивности низкочастотных конденсаторов C_X и C_Y и шунтирующего конденсатора малой емкости. То есть получим параллельный колебательный контур, который, имея на резонансной частоте большое сопротивление, представляет на этой частоте «фильтр-пробку» в поперечной ветви ФРП. При этом произойдет резкое уменьшение ослабления ЭМП фильтром радиопомех на резонансной частоте, в котором конденсаторы $C_X = 1,3$ мкФ с паразитной индуктивностью $L = 10$ нГн зашунтированы высокочастотными конденсаторами со значениями емкости 0,3 мкФ, 0,21 мкФ, 0,11 мкФ и 0,01 мкФ (рис. 10).

На рис. 10 видим резонансные всплески уменьшения ослабления помех в высокочастотной части защищаемого диапазона выше трех МГц. Чем меньше номинал шунтирующей емкости, тем выше частота резонансного ослабления помех и меньше величина ослабления помех сетевым фильтром. Для уменьшения резонансного всплеска ослабления помех следует последовательно с шунтирующим высокочастотным конденсатором ставить последовательно резистор с сопротивлением порядка 100 мОм и больше. Величина этого резистора зависит от величины паразитной индуктивности конденсатора C_X и величины

шунтирующей емкости. Величина резистора увеличивается с ростом паразитной индуктивности конденсатора и уменьшением значения шунтирующей емкости. Для определения рационального значения резистора и шунтирующего конденсатора, при которых компенсируется негативное влияние паразитной индуктивности конденсатора C_X на ЧХ вносимого ФРП ослабления помех, необходимо знание паразитной индуктивности конденсатора C_X . Этот параметр отечественные производители конденсаторов не предоставляют.

Заключение

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 $\varepsilon(j\omega)$ и модели дросселя с учетом нелинейных частотно-зависимых характеристик магнитной проницаемости $\mu(j\omega)$ и их эквивалентные электрические схемы замещения. Установлена связь паразитных 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 $\varepsilon(j\omega)$ и $\mu(j\omega)$.

С использованием полученных схем замещения конденсаторов и дросселей выполнено проектирование высокочастотных сетевых ФРП.

Показана ошибочность рекомендаций устранения отрицательного влияния паразитной индуктивности низкочастотных конденсаторов с помощью параллельного включения шунтирующих высокочастотных конденсаторов.

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. К теории дискретности магнитной проницаемости ферромагнитных тел. М.: Наука, 1969. 512 с.
2. Синтез эквивалентных частотных схем замещения дросселя / В.Ф. Дмитриков [и др.] // Практическая силовая электроника. 2017. № 2 (66). С. 5–11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29431825>.
3. 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), Erlagol (Altai Republic), Russia. 2019. P. 532–540. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM.2019.8823489>.
4. Разработка высокочастотных электрических схем замещения конденсаторов и дросселей с учетом частотных свойств диэлектрической и магнитной проницаемости диэлектриков и магнетиков / В.Ф. Дмитриков [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 2. С. 55–69. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.2.55-69>.
5. Морозов А.И. Физика твердого тела. Электроны в кристалле. Металлы. Полупроводники. Диэлектрики. Магнетики. Сверхпроводники. М.: МГИРЭИ, 2008. 192 с.
6. Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов / В.А. Головин [и др.]. М.: Техносфера, 2016. 272 с.
7. Фрелих Г. Теория диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость и диэлектрические потери / пер. с англ. М.: Издательство иностранной литературы, 1960. 251 с.
8. ГОСТ Р 51527-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Стабилизированные источники питания постоянного тока. Кондуктивные электромагнитные помехи. Нормы и методы испытаний. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 8 с.
9. Дмитриков В.Ф., Шушпанов Д.В. Устойчивость и электромагнитная совместимость устройств и систем электропитания. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. 540 с.
10. FASTMEAN. URL: <http://www.fastmean.ru>.
11. Разработка унифицированных модулей фильтров электромагнитных помех в цепях вторичного электропитания с функциями защиты от импульсных токов и перенапряжений / В.Ф. Дмитриков [и др.] // Электропитание. 2018. № 2. С. 45–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36387416>.
12. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / пер. с англ. В.С. Кармашева. М.: Технологии, 2003. 540 с.

References

1. Landau L.D., Livshits E.M. *On the Theory of Discreteness of the Magnetic Permeability of Ferromagnetic Bodies*. Moscow: Nauka, 1969, 512 p. (In Russ.)
2. Dmitrikov V.F. et al. Synthesis of equivalent frequency equivalent circuits of the choke. *Prakticheskaja silovaja elektronika*, 2017, no. 2 (66), pp. 5–11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29431825>. (In Russ.)
3. 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)*, Erlagol (Altai Republic), Russia, 2019, pp. 532–540. DOI: <https://doi.org/10.1109/EDM.2019.8823489>.

4. Dmitrikov V.F. et al. Development of high-frequency electrical circuits for the replacement of capacitors and chokes, taking into account the frequency properties of the dielectric and magnetic permeability of dielectrics and magnets. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 55–69. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.2.55-69>. (In Russ.)
5. Morozov A.I. *Solid State Physics. Electrons in a Crystal. Metals. Semiconductors. Dielectrics. Magnets. Superconductors*. Moscow: MGIREiA, 2008, 192 p. (In Russ.)
6. Golovin V.A. et al. *Physical Foundations, Research Methods and Practical Application of Piezo Materials*. Moscow: Tehnosfera, 2016, 272 p. (In Russ.)
7. Frel'ih G. *Dielectric Theory. Dielectric Constant and Dielectric Loss*. Trans. from English. Moscow: Izdatel'stvo inostranoj literatury, 1960, 251 p. (In Russ.)
8. GOST R 51527-99. *Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Regulated DC Power Supplies. Conducted Electromagnetic Interference. Standards and Test Methods*. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2000, 8 p. (In Russ.)
9. Dmitrikov V.F., Shushpanov D.V. *Immunity and Electromagnetic Compatibility of Devices and Power Supply Systems*. Moscow: Gorjachaja liniya – Telekom, 2019, 540 p. (In Russ.)
10. FASTMEAN. URL: <http://www.fastmean.ru>. (In Russ.)
11. Dmitrikov V.F. et al. Development of unified modules for filters of electromagnetic interference in secondary power supply circuits with functions of protection against impulse currents and overvoltages. *Elektropitanie*, 2018, no. 2, pp. 45–63. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36387416>. (In Russ.)
12. Williams T. *EMC for Product Designers*. Trans. from English by V.S. Karmashev. Moscow: Tehnologii, 2003, 540 p. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2020, vol. 23, no. 4, pp. 85–96

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.4.85-96

Received 4 December 2020
Accepted 21 December 2020

Features of designing line radio interference filter in a wide frequency range, taking into account equivalent circuits for capacitors and inductors

Vladimir F. Dmitrikov¹, Alexander Yu. Petrochenko²,
Vyacheslav M. Isaev³, Dmitriy V. Shushpanov¹

¹ The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg
State University of Telecommunications
22, bld. 1, Avenue Bolshevikov,
Saint Petersburg, 193232, Russia

² JSC «Concern Aurora SPA»
15, Karbysheva Street,
Saint Petersburg, 194021, Russia

³ JSC «Roselectronika»
29, bld. 141, Vereiskaya Street,
Moscow, 121357, Russia

Abstract – Based on the phenomenological equations describing the dynamic processes of magnetization of ferromagnets of inductors and polarization of capacitor dielectrics, taking into account complex frequency-dependent dielectric constants $\epsilon(j\omega)$ of capacitor dielectrics and magnetic permeabilities $\mu(j\omega)$ of inductor cores, equivalent electrical structural-parametric and capacitor replacement circuits were obtained. The connection of parasitic elements of equivalent electric circuits of capacitors and inductors with the electrophysical characteristics of the material of the dielectric of the capacitor and the inductor core, which determine their frequency properties, structure and parameters of the elements of the equivalent circuit, is established. The features of the design of line radio interference filter taking into account the parasitic parameters of the inductors and capacitors of line radio interference filter, found as a result of the synthesis of equivalent electric circuits of the inductors and capacitors in a wide frequency range of 150 kHz – 30 MHz.

Keywords – dielectric constant, permeability, radio interference filter, behavioral model.

Информация об авторах

Дмитриков Владимир Федорович, 1939 г. р., доктор технических наук, профессор кафедры теории электрических цепей и связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия. Заслуженный деятель науки РФ,

Information about the Authors

Vladimir F. Dmitrikov was born in 1939, 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. He is Honored worker of science of the Russian Federation, «Gazprom»

лауреат премии ОАО «Газпром», академик РАЕН, член-корр. АЭН, член-корр. МАН ВШ. Окончил в 1967 г. Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, радиофизический факультет. Член бюро совета «Научные проблемы систем электропитания» при отделении РАН «Электрофизика, энергетика, электротехника». Автор более 350 научных работ и изобретений, в том числе шести монографий, пяти учебников и четырех учебных пособий.

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, 1995 г. р., аспирант АО «Концерн «НПО «Аврора»», г. Санкт-Петербург, Россия. Окончил в 2017 г. факультет фундаментальной подготовки Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Автор 17 научных работ.

Область научных интересов: энергетически высокоэффективные ключевые режимы генерирования и усиления электрических колебаний и информационных сигналов.

E-mail: petrochenko_a@bk.ru

Исаев Вячеслав Михайлович, доктор технических наук, профессор, директор по научно-техническому развитию и инновациям АО «Российская электроника», г. Москва, Россия.

Область научных интересов: энергетически высокоэффективные ключевые режимы генерирования и усиления электрических колебаний и информационных сигналов.

E-mail: info@ruselectronics.ru

Шушпанов Дмитрий Викторович, 1980 г. р., кандидат технических наук, доцент кафедры теории электрических цепей и связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия. Окончил в 2002 г. факультет многоканальных телекоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. В 2005 г. окончил аспирантуру при Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Автор более 110 научных работ, в том числе одной монографии и одного учебного пособия.

Область научных интересов: энергетически высокоэффективные ключевые режимы генерирования и усиления электрических колебаний и информационных сигналов, теория линейных и нелинейных электрических цепей, устройства преобразовательной техники.

E-mail: dimasf@inbox.ru

prize winner, full member of the Russian academy of physical sciences, corresponding member of the academy of electrical sciences, corresponding member of the International higher education academy of sciences, member of Bureau of the Council «Scientific Problems of Power Supply Systems» at the «Electrophysics, Power Industry, Electrical Engineering» Department of the Russian academy of sciences. He graduated the Leningrad polytechnic institute, the radiophysical department in 1967. He is an author and co-author of more than 350 scientific works and inventions, including 6 monographs, 5 textbooks and 4 training guidelines.

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 was born in 1995, postgraduate student of JSC «Concern «Aurora SPA»», Saint Petersburg, Russia. He received the B.S. and M.S. degrees in radio engineering from the Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications in 2017. He is an author of 17 articles.

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

E-mail: petrochenko_a@bk.ru

Vyacheslav M. Isaev, Doctor of Engineering, professor, director in technological progressing and innovation, JSC «Roselectronika», Moscow, Russia.

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

E-mail: info@ruselectronics.ru

Dmitriy V. Shushpanov was born in 1980, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the department of Theory of Electrical Circuits and Communications in the Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications. He graduated from the Multichannel Telecommunication System department of the Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications in 2002. He is an author and co-author of more than 110 scientific works including 1 monograph and 1 training guideline.

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

E-mail: dimasf@inbox.ru