

Удельная мощность силовых индуктивностей и емкостей

Д.С. Смирнов

Рассмотрены причины, ограничивающие удельную реактивную мощность, которую возможно пропускать через материалы силовых индуктивностей и емкостей. Эти причины можно условно разделить на энергетические и тепловые. Энергетические ограничения вытекают из конечной удельной энергоемкости материалов и заданной частоты преобразования. Тепловые ограничения возникают из-за наличия тепловых потерь в реальном реактивном элементе и неидеальных условий охлаждения. Расчет тепловых режимов материалов ведется с учетом тангенса угла потерь, максимальной температуры работы и термического сопротивления элемента.

В работе предложена универсальная методика расчета оптимальной частоты преобразования и максимально допустимой удельной реактивной мощности активных материалов. Данная методика позволяет выбрать режим работы реактивного материала, при котором полностью используются его возможности как по энергетическим, так и тепловым параметрам. Применяемая оценка материалов по максимально допустимой удельной реактивной мощности отличается от традиционного рассмотрения коэффициента производительности и параметров Штейнмеца, но является их логическим продолжением. Разработанная методика расчета ориентирована на практические инженерные расчеты — в ней используются общепринятые параметры, приводимые производителями в описаниях к материалам. Также для упрощения расчетов при анализе не учитываются амплитудная и частотная нелинейности потерь. Проведенный по предложенной методике анализ показал, что наибольшей удельной реактивной мощностью обладают высокочастотные материалы с малой энергоемкостью в диапазоне значений частоты преобразования 0,3...3 МГц. Согласно результатам анализа, наиболее перспективными материалами являются высокочастотная конденсаторная керамика и никель-цинковые ферриты с низкой проницаемостью. Большая удельная реактивная мощность достижима при использовании реактивных компонентов без активных материалов в диапазоне 3...300 МГц. В данном диапазоне возможна реализация высокодобротных реактивных элементов без применения материалов с высокой диэлектрической или магнитной проницаемостью. При исключении активных материалов оказывается возможна штатная работа реактивных элементов при температурах, близких к температуре плавления проводника.

Ключевые слова: конденсатор, реактор, дроссель, реактивный элемент, удельная мощность, коэффициент производительности, параметры Штейнмеца, уравнение Штейнмеца.

Specific Capacity of Power Inductors and Capacitors

D.S. Smirnov

Factors imposing limitations on the specific reactive power that can be passed through materials of power inductors and capacitors are considered. These factors can be conditionally divided into those related to energy and thermal constraints. Energy constraints are stemming from the finite specific energy capacity of materials and the preset conversion frequency. Thermal constraints arise from heat losses in a real reactive element and from imperfect cooling conditions. Thermal operating conditions of different materials are calculated taking into consideration the dielectric loss tangent, the maximum operating temperature, and thermal resistance of the element. A universal procedure for calculating the optimal conversion frequency and maximum permissible specific reactive power of active materials is proposed. By using the proposed procedure, it is possible to select the reactive material operation mode in which its energy and thermal capabilities are used to the full extent. The assessment of materials by the maximum permissible specific reactive power that is used in this study differs from the conventionally applied approach to considering the performance factor and Steinmetz parameters; nonetheless, it is their logical extension. The developed calculation procedure is supposed to be applied in practical engineering calculations: it uses generally accepted parameters given by producers in the descriptions of materials. Also, to simplify the calculations, the amplitude and frequency nonlinearities of losses are not considered in the analysis. The analysis carried out in accordance with the proposed procedure has shown that high-frequency materials with low energy capacity have the highest specific reactive power capacity in the range of conversion frequencies from 0.3 to 3 MHz. According to the analysis results, high-frequency capacitor ceramics and nickel zinc ferrites with low permeability are the most promising materials. In case of using reactive components without active materials, a high specific reactive power is achievable in the frequency range 3...300 MHz. Reactive elements with a high Q-factor can be implemented in this frequency range without using materials having high permittivity or permeability. Reactive elements constructed without using active materials can operate in the regular design mode at temperatures close to the conductor melting point.

Key words: capacitor, inductor, choke, reactive component, specific power capacity, performance factor, Steinmetz parameters, Steinmetz equation.

Удельная мощность преобразователей прежде всего связана с двумя параметрами: с частотой преобразования и КПД. Частота работы преобразователя влияет на требуемую энергоемкость пассивных компонентов: конденсаторов и дросселей и, соответственно, на их массогабариты. При условии использования одних типов материалов в пассивных компонентах масса этих материалов обратно пропорциональна частоте преобразования. При ряде допущений можно утверждать, что с увеличением частоты преобразования на порядок масса активных материалов реактивных элементов также снижается на порядок. Это соотношение верно, если не учитываются тепловые режимы работы и частотная нелинейность потерь — фактическое приращение плотности мощности будет несколько меньше. При увеличении частоты и удельной мощности обостряется проблема отвода теплоты от компонентов. Если для обычного 50 Гц трансформатора с мощностью 25 Вт/кг считается приемлемым $\eta = 0,75$, то для малогабаритного высокочастотного трансформатора с мощностью 8000 Вт/кг требуется значительно больший КПД — $\eta = 0,97...0,99$, так как через магнитопровод той же массы пропускается значительно большая мощность.

Количественно данные закономерности удобно выражать через удельную реактивную мощность

$$Q_V = Q_{\max}/V, \quad (1)$$

где Q_V — максимальная удельная реактивная мощность материала, ВАр/дм³; Q_{\max} — максимальная реактивная мощность через заданный объем материала, ВАр; V — объем активного материала, дм³.

Физический смысл этого параметра состоит в максимальной реактивной мощности, которая может быть пропущена через диэлектрик конденсатора или магнитопровод дросселя заданного объема. Соответственно при известных активной мощности преобразователя и удельной реактивной мощности материалов можно вычислить минимальный требуемый объем материалов реактивных элементов. Параметр максимальной удельной мощности не зависит от конструктивного исполнения реактивного элемента, т. е. от индуктивности и тока дросселя или от емкости и напряжения конденсатора — имеет значение лишь тангенс угла потерь и удельная энергоемкость материала. Для упрощения анализа в дальнейших расчетах рассматривается случай синусоидальных токов и напряжений в реактивных элементах. Несинусоидальные сигналы могут быть проанализированы по отдельным гармоническим составляющим после разложения в ряд Фурье.

Рассмотрим ограничения удельной реактивной мощности элемента по тепловыделению. Как известно, тангенс угла потерь определяется как отношение активной мощности элемента к реактивной:

$$\operatorname{tg}\delta = P_V/Q_V, \quad (2)$$

где P_V — максимально допустимая удельная мощность потерь, Вт/дм³; $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь в заданном режиме работы.

Как видно из выражения, максимальная удельная реактивная мощность зависит от допустимой удельной мощности нагрева и тангенса угла потерь на заданной частоте. Тангенс угла потерь материала нелинейно зависит от частоты и амплитуды внешнего поля. В общем случае он должен быть найден по диэлектрическим и магнитным спектрам материалов. В частном случае до некоторой критической частоты тангенс угла потерь на произвольной частоте может быть найден исходя из тангенса угла потерь на заданной частоте:

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{np}} = f_{\text{np}}/f_3 \operatorname{tg}\delta_3, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg}\delta_{\text{np}}$ — тангенс угла потерь на произвольной частоте; $\operatorname{tg}\delta_3$ — нормированный на заданной частоте тангенс угла потерь; f_{np} — произвольная частота, Гц; f_3 — частота измерения нормированного тангенса угла потерь, Гц.

В этом случае подразумевается линейная зависимость между удельными потерями и частотой, а зависимость угла потерь от амплитуды приложенного поля не учитывается. В случае строгого рассмотрения следует искать активные потери в материале на заданной частоте по уравнению Штейнмеца (Steinmetz's equation), однако параметры данного уравнения для большей части материалов в открытой литературе не представлены.

Допустимая удельная мощность тепловыделения в реактивном элементе зависит от его геометрических размеров, теплопроводности, условий охлаждения, максимально допустимой температуры компонента и температуры среды. При условии высокой теплопроводности элемента удельную допустимую мощность тепловыделения можно найти из выражения:

$$P_V = (T_{\max} - T_0)/R_{TV}, \quad (4)$$

где T_{\max} — максимально допустимая температура материала, °С; T_0 — температура среды, °С; R_{TV} — удельное термическое сопротивление, °С·дм³/Вт.

Таким образом, выражение (2) можно записать в виде

$$Q_V = (T_{\max} - T_0)/R_{TV} \operatorname{tg}\delta. \quad (5)$$

Физическое значение данного выражения состоит в нахождении удельной реактивной мощности, при пропуске которой реактивный элемент разогревается до предельно допустимой температуры. Удельная реактивная мощность одного материала может изменяться в зависимости от термического сопротивления, а оно, в свою очередь, зависит от размеров элемента. Тем не менее при рассмотрении реактивных элементов с одинаковыми геометрическими размерами и одинаковым термическим сопротивлением, можно проводить корректное сравнение материалов. Сам расчет теплового сопротивления элемент–среда является отдельной научной задачей и в рамках данной работы не рассматривается. Оценить тепловое сопротивление элементов на печатной плате без принудительного охлаждения

можно по аналогии. Например, на основе резисторов P1-12-2, °С·дм³/Вт,

$$R_{IV} = \frac{(T_{\max} - T_{st})V}{P_{\text{ном}}} = \frac{(155 - 85) \cdot 30 \cdot 10^{-6}}{2} = 1,05 \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

где T_{\max} — максимальная температура резистора, °С; T_{st} — минимальная температура снижения мощности, °С; $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность резистора, Вт.

Дальнейшие расчеты удельной реактивной мощности проводятся для значения удельного теплового сопротивления 0,001 °С·дм³/Вт. В источнике [1] для тех же целей предложено использование параметра допустимой удельной мощности потерь, однако данный подход не позволяет учитывать температуру среды и максимальную температуру работы материала.

Другим фактором, ограничивающим допустимую удельную реактивную мощность, является удельная энергоёмкость. Как известно, реактивная мощность через идеальный реактивный элемент определяется как

$$Q_V = (I_{\text{rms}}^2 X_L) / V \quad (7)$$

или

$$Q_V = U_{\text{rms}}^2 / (X_C V), \quad (8)$$

где I_{rms} — действующий ток через индуктивность, А; X_L — реактивное сопротивление индуктивности, Ом; U_{rms} — действующее напряжение на конденсаторе, В; X_C — реактивное сопротивление конденсатора, Ом.

Удельную энергоёмкость магнитного и диэлектрического материалов определяют следующим образом:

$$E_{VL} = \frac{B_{\max} H}{2 \cdot 1000} = \frac{B_{\max}^2}{2 \cdot 1000 \mu_0 \mu} = \frac{L(\sqrt{2} I_{\text{rms}})^2}{2V}; \quad (9)$$

$$E_{VC} = \frac{D_{\max} E}{2 \cdot 1000} = \frac{E_{\max}^2}{2 \cdot 1000 \epsilon_0 \epsilon} = \frac{C(\sqrt{2} U_{\text{rms}})^2}{2V}, \quad (10)$$

где E_{VL} — удельная энергоёмкость магнитопровода, Дж/дм³; E_{VC} — удельная энергоёмкость диэлектрика, Дж/дм³; B_{\max} — индукция магнитного поля в точке насыщения, Тл; H — напряженность магнитного поля в точке насыщения, А/м; D_{\max} — индукция электрического поля в точке пробоя, Кл/м²; E — напряженность электрического поля в точке пробоя, В/м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная, Гн/м; μ — относительная магнитная проницаемость; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная, Ф/м; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость.

Следовательно, удельную реактивную мощность можно выразить в виде

$$Q_V = \frac{\pi f B_{\max}^2}{\mu_0 \mu 1000} = \frac{2\pi f L I_{\text{rms}}^2}{V} = \frac{\pi f L I_{\text{max}}^2}{V}; \quad (11)$$

$$Q_V = \frac{\pi f D_{\max}^2}{\epsilon_0 \epsilon 1000} = \frac{2\pi f C U_{\text{rms}}^2}{V} = \frac{\pi f C U_{\text{max}}^2}{V}, \quad (12)$$

где I_{max} — ток насыщения индуктивности, А; U_{max} — напряжение пробоя емкости, В.

Согласно данному выражению, при фиксированной частоте преобразования максимальная удельная мощность достигается при использовании материалов с максимальной удельной энергоёмкостью. Физический смысл выражений (11) и (12) состоит в определении удельной реактивной мощности, циркулирующей через реактивный элемент на заданной частоте в критическом режиме работы материала, т. е. при максимально допустимом напряжении на конденсаторе и максимально допустимом токе в дросселе. Как следует из данных уравнений, допустимая реактивная мощность идеального элемента может неограниченно возрастать с ростом частоты.

Для расчета допустимой удельной реактивной мощности реальных элементов следует использовать оценку по трем выражениям: (5), (11) и (12). Оптимальная частота использования активного материала может быть найдена из условий работы в критическом режиме как по теплоте, так и по запасаемой энергии:

$$f = \frac{1000 \mu_0 \mu (T_{\max} - T_0)}{\pi B_{\max}^2 R_{IV} \text{tg} \delta_{f,R}}; \quad (13)$$

$$f = \frac{V(T_{\max} - T_0)}{\pi C U_{\text{max}}^2 R_{IV} \text{tg} \delta_{f,D}}. \quad (14)$$

Поскольку тангенс угла потерь нелинейно зависит от частоты и от амплитуды сигнала, решение данных уравнений в общем случае следует искать численными методами. Зачастую потери в магнитопроводе приводятся производителями в виде

$$P_{VL} = k_L B_{\max}^\alpha f^\beta. \quad (15)$$

Аналогично можно представить потери в конденсаторе

$$P_{VC} = k_C D_{\max}^\alpha f^\beta, \quad (16)$$

где P_{VL} — удельное тепловыделение в магнитопроводе, Вт/м³; P_{VC} — удельное тепловыделение в диэлектрике, Вт/м³; k_L, k_C — коэффициенты пропорциональности; α — коэффициент потерь по индукции, $\alpha > 2$; β — коэффициент потерь по частоте, $\beta > 1$.

Тангенсы углов потерь на заданной частоте могут быть найдены по выражениям:

$$\text{tg} \delta = \frac{k_L}{\pi} \mu_0 \mu B_{\max}^{\alpha-2} f^{\beta-1}; \quad (17)$$

$$\text{tg} \delta = \frac{k_C}{\pi} \epsilon_0 \epsilon D_{\max}^{\alpha-2} f^{\beta-1}. \quad (18)$$

Следовательно, оптимальная частота работы магнитопровода составляет

$$f = \sqrt[\beta]{\frac{1000(T_{\max} - T_0)}{k_L R_{IV} B^\alpha}}. \quad (19)$$

При допущении линейности изменения потерь от частоты $\beta = 1$ и их строгой пропорциональности реак-

тивной мощности через элемент $\alpha = 2$ с помощью (3) можно вывести формулы для определения оптимальных частот каждого из материалов реактивных элементов:

$$f = \sqrt{\frac{1000 f_3 \mu_0 \mu (T_{\max} - T_0)}{\pi B_{\max}^2 R_{IV} \operatorname{tg} \delta_3}}; \quad (20)$$

$$f = \sqrt{\frac{f_3 V (T_{\max} - T_0)}{\pi C U_{\max}^2 R_{IV} \operatorname{tg} \delta_3}}. \quad (21)$$

При частоте работы реактивного элемента меньше оптимальной частоты удельная реактивная мощность ограничивается энергоемкостью материала, а при частоте выше оптимальной — температурным режимом. Вычисление оптимальных рабочих частот по выражениям (20) и (21) дает приближенный результат и служит для сравнительной оценки серийно производимых элементов. В случае с конденсаторами в вычислении удельной реактивной мощности по (21) рассматриваются как потери в диэлектрике, так и омические потери в обкладках. В случае с вычислением удельной реактивной мощности индуктивности по (20) рассматриваются только потери в магнитопроводе. Омические потери в обмотке зависят от ее конструкции. Приведенные выражения верны для случая работы

активного материала на пределе возможностей по значениям индукции электрического и магнитного полей B_{\max} и D_{\max} , однако в реальных технических системах работа реактивных элементов в данном режиме крайне нежелательна. Введение коэффициента запаса и снижение фактических B и D относительно теоретически возможных величин приводит к увеличению значений оптимальных рабочих частот.

В целом примененный подход совпадает с подходом к расчету в работах [1, 2], однако вместо коэффициента производительности и параметров Штейнмеца для оценки эффективности материалов используется максимальная удельная реактивная мощность. Данный параметр лучше подходит для сравнительного анализа активных материалов разных классов и позволяет рассматривать задачи оптимизации по теплоте и удельной мощности в комплексе.

Как известно, предельная частота работы реактивного элемента определяется не только тепловыми режимами, но и собственной частотой резонанса. В рамках данного расчета собственная частота принимается значительно больше рабочей частоты. Результаты расчетов удельной мощности для основных типов реактивных элементов приведены в табл. 1 и 2.

Из современных конденсаторных материалов максимальную удельную реактивную мощность 104 МВАр/дм³

Таблица 1

Максимальная удельная реактивная мощность конденсаторов

Тип конденсатора	Удельная энергоемкость, Дж/дм ³	Тангенс угла потерь tgδ	Частота измерения потерь, Гц	Максимальная температура, °С	Оптимальная частота работы, Гц	Удельная реактивная мощность, кВАр/дм ³
С двойным электронным слоем	34 520	0,047	0,01	65	0,198	43
Алюминиевый электролитический	640	0,05	300	85	299	1,2·10 ³
Оксидно-полупроводниковый ниобиевый	54,9	0,12	120	85	417	144
Керамический низкочастотный	269	0,02	1000	150	1,82·10 ³	3,42·10 ³
Пленочный полиэфирфталатный (полиэстеровый, лавсановый, майларовый)	35,2	0,01	1000	125	6,68·10 ³	1,5·10 ³
Пленочный полипропиленовый	42,1	0,011	10 000	85	14,4·10 ³	3,8·10 ³
Пленочный полистирольный	1,2	0,0015	1000	85	72,8·10 ³	549
Пленочный полифенилсульфидный	9,35	0,00015	1000	150	119·10 ³	7·10 ³
Пленочный фторопластовый	0,261	0,0015	1000	200	267·10 ³	436
Керамический высокочастотный	3,16	0,0015	10 ⁶	125	1,83·10 ⁶	36,3·10 ³
Керамический радиочастотный	8,52	0,0005	10 ⁶	125	1,92·10 ⁶	104·10 ³
Стекланный	0,346	0,0015	10 ⁶	125	5,54·10 ⁶	12·10 ³

Таблица 2

Максимальная удельная реактивная мощность магнитопроводов

Вид материала	Тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$	Частота измерения тангенса угла потерь, Гц	Максимальная температура (температура Кюри), °С*	Оптимальная частота работы материала, кГц	Удельная реактивная мощность, кВАр/дм ³
Сталь холоднокатаная изотропная	0,12	50	180 (740)	1,6	40,4
Порошок сплава железо-кремний	0,045	$50 \cdot 10^3$	180 (700)	92	$1,87 \cdot 10^3$
Порошок сплава железо-кремний-бор	0,02	$250 \cdot 10^3$	180 (400)	432	$4,49 \cdot 10^3$
Карбонильное железо	0,0066	$500 \cdot 10^3$	180 (770)	434	$27,1 \cdot 10^3$
Порошок сплава алюминий-кремний-железо	0,02	$500 \cdot 10^3$	180 (500)	555	$6,98 \cdot 10^3$
Порошок нанокристаллического сплава на основе железа	0,016	$300 \cdot 10^3$	180 (570)	$1,32 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$
Порошок сплава никель-железо-молибден	0,014	$300 \cdot 10^3$	180 (460)	$1,41 \cdot 10^3$	$2,35 \cdot 10^3$
Низкочастотный никель-цинковый феррит	0,1	$30,5 \cdot 10^6$	90 (120)	$2,23 \cdot 10^3$	$8,89 \cdot 10^3$
Аморфный сплав на основе железа	0,017	$300 \cdot 10^3$	150 (420)	$2,39 \cdot 10^3$	923
Никель-марганцевый феррит**	0,021	$500 \cdot 10^3$	155 (240)	$3,41 \cdot 10^3$	907
Высокочастотный никель-цинковый феррит	0,01	$10 \cdot 10^6$	180 (600)	$4,82 \cdot 10^3$	$32,1 \cdot 10^3$

* Максимальная температура шихтованного и порошковых материалов определяется нагревостойкостью покрытия сердечника и изоляции обмотки. Нагревостойкость принята равной 180 °С, что соответствует классу Н и кремнийорганической изоляции.

** Полученное значение оптимальной частоты превышает частоту резонанса доменных границ, следовательно, для данного размера элемента использованная методика расчета дает некорректные результаты.

на частоте 1,92 МГц обеспечивают высокочастотные термостабильные керамические конденсаторы NP0 (C0G). Именно их принято использовать в преобразователях мегагерцового диапазона. Высоковольтные вакуумные конденсаторы (Jennings CFFP-2000-35S) обеспечивают пропускание удельной реактивной мощности до 16,6 МВАр/дм³ на частоте 30 МГц при объеме 5 дм³. При термическом сопротивлении 0,001 °С·дм³/Вт вакуумные конденсаторы, вероятно, превосходят керамические.

Из рассмотренных магнитомягких материалов максимальную удельную реактивную мощность 32,1 МВАр/дм³ на частоте 4,8 МГц обеспечивает высокочастотный никель-цинковый феррит N40. Согласно работе [1], оптимальная частота работы материала N40 составляет 7 МГц. С учетом различающихся термических сопротивлений и введенных допущений результаты можно считать близкими. Указанные удельные реактивные мощности материалов приведены для случая замкнутого магнитопровода без зазора. При введении зазора в магнитопровод, удельная энергоемкость магнитной системы возрастает одновременно с увеличением потерь в меди. Плотность реактивной мощности в индуктивности с зазором ограничивается тремя факторами: максимальной температурой, индукцией насыщения материала и частотой резонанса доменных границ

материала магнитопровода. Критическая частота и индукция насыщения никель-цинкового феррита N40 составляют 80 МГц и 0,2 Тл. Обойти данные ограничения возможно лишь исключением магнитопровода из магнитной цепи. В этом случае для расчета силового дросселя возможно применение формул и методик расчета, используемых в радиотехнике [3—5]. Расчет потерь в катушке индуктивности с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости является нетривиальной задачей, однако можно выделить однозначную закономерность: снижение омической составляющей тангенса угла потерь с ростом частоты сигнала. Если считать диэлектрические потери и потери на излучение пренебрежимо малыми, тангенс угла потерь можно представить как отношение активного сопротивления обмотки к реактивному на заданной частоте:

$$\operatorname{tg}\delta = R_{ser}/X_L \quad (22)$$

Реактивное сопротивление воздушной катушки строго пропорционально частоте. На достаточно высоких частотах (диаметр провода значительно больше толщины скин-слоя) активное сопротивление обратно пропорционально толщине скин-слоя.

Зависимость активного сопротивления катушки индуктивности от частоты можно представить в виде

$$R_{ser} = k_R \sqrt{f}, \quad (23)$$

где k_R — коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии и материала катушки.

Если пренебречь диэлектрическими потерями в воздухе и потерями на излучение, тангенс угла потерь воздушной катушки можно представить в виде

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{k_R \sqrt{f}}{2\pi f L} = \frac{k_R}{2\pi \sqrt{f} L}. \quad (24)$$

В этом случае допустимая реактивная мощность через катушку определяется лишь качеством поверхности проводника, геометрическими размерами и достижимой частотой преобразования. Сверху частота преобразования ограничивается диэлектрическими потерями, потерями на излучение и перегревом активных элементов схемы.

В рамках работы проведен расчет цилиндрической однослойной катушки диаметром 10 мм и длиной 10 мм, работающей на частоте 10 МГц. Термическое сопротивление катушки без сердечника принято равным $0,001 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{дм}^3/\text{Вт}$, а температура катушки — равной температуре плавления меди. Допустимая удельная реактивная мощность без учета объема экрана составила $132 \text{ МВАр}/\text{дм}^3$, что значительно превышает плотность реактивной мощности катушки индуктивности с сердечником из высокочастотного никель-цинкового феррита при меньшей массе. Таким образом, в коротковолновом и ультракоротковолновом диапазонах однослойные катушки без сердечника обладают высокими энергетическими характеристиками и могут применяться в качестве силовых.

Проведенный анализ показал, что высокочастотные диэлектрические и магнитные материалы имеют высокую допустимую удельную мощность и в диапазоне частот $0,3 \dots 3 \text{ МГц}$ могут конкурировать с традиционными силовыми материалами. Наибольшей допустимой удельной реактивной мощностью на сегодняшний день обладают термостабильные конденсаторные керамики NPO (CaZrO_3) и никель-цинковые ферриты. Большая удельная реактивная мощность может быть получена при использовании реактивных элементов без активных материалов в диапазоне частот $3 \dots 300 \text{ МГц}$.

Литература

1. **Hanson A.J., Belk J.A., Lim S., Perreault D.J., Sullivan C.R.** Measurements and Performance Factor Comparisons of Magnetic Materials at High Frequency //

Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE. 2015. Pp. 5657—5666.

2. **Han Y., Perreault D.J.** Inductor Design Methods with Low-Permeability RF Core Materials // IEEE Transactions on Industry Applications. 2012. V. 48. No 5. Pp. 1616—1627.

3. **Радиодетали**, радиокомпоненты и их расчет / под ред. А.В. Коваля. М.: Сов. радио, 1977.

4. **Arnold A.H.M.** The Resistance of Round-Wire Single-Layer Inductance Coils // Monograph. Radiosection. 1951. No.9. Pp. 94—100.

5. **Knight D.W.** An Introduction to the Art of Solenoid Inductance and Impedance Calculation: Part II. Solenoid Impedance and Q. URL: <http://g3ynh.info/zdocs/magnetics/SolenoidZ.pdf>. 4 Feb. 2016

References

1. **Hanson A.J., Belk J.A., Lim S., Perreault D.J., Sullivan C.R.** Measurements and Performance Factor Comparisons of Magnetic Materials at High Frequency // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE. 2015:5657—5666.

2. **Han Y., Perreault D.J.** Inductor Design Methods with Low-Permeability RF Core Materials // IEEE Transactions on Industry Applications. 2012;48;5:1616—1627.

3. **Radiodetali**, Radiokomponenty i ikh Raschet / Pod Red. A.V. Kovalya. M.: Sov. radio, 1977. (in Russian).

4. **Arnold A.H.M.** The Resistance of Round-Wire Single-Layer Inductance Coils // Monograph. Radiosection. 1951;9:94—100.

5. **Knight D.W.** An Introduction to the Art of Solenoid Inductance and Impedance Calculation: Part II. Solenoid Impedance and Q. URL: <http://g3ynh.info/zdocs/magnetics/SolenoidZ.pdf>. 4 Feb. 2016

Сведения об авторе

Смирнов Дмитрий Сергеевич — аспирант Вятского государственного университета, инженер-конструктор группы схемотехники электроавтоматики обособленного подразделения центра проектирования АО «Технодинамика», г. Киров, e-mail: SmirnovDS@technodinamika.ru

Information about author

Smirnov Dmitriy S. — Ph.D.-student of Vyatka State University, Engineer-Constructor of Group PLC Circuitry Separate Subdivision Design Center JSC «Technodynamics», Kirov, e-mail: SmirnovDS@technodinamika.ru

Статья поступила в редакцию 21.10.2016