

ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ КАРКАСНОГО МАТЕРИАЛА НА ДОБРОТНОСТЬ ОДНОСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАТУШЕК

Р. М. КЕССЕНИХ

(Представлено профессором доктором А. А. Воробьевым)

Введение

Полная и достаточно строгая трактовка вопроса о влиянии электрического поля в каркасном материале катушки на ее параметры в рабочих условиях представляет существенный интерес с точки зрения конструирования стабильных деталей.

Соответствующая электродинамическая задача в полной формулировке является сложной.

Естественно, что общая электродинамическая формулировка задачи во всей ее полноте не представляет для техники никакой ценности, если не установлены хотя бы предельные случаи, в которых строгая постановка подтверждает упрощенную инженерную трактовку задачи, согласующуюся с экспериментом и практикой конструирования радиодеталей.

Проблема однослойной цилиндрической катушки привлекала внимание многих физиков-теоретиков и экспериментаторов и рассматривалась как в самом упрощенном виде, так и в более строгой постановке. Однако задачи, связанные с рассмотрением вторичных явлений, обусловленных влиянием диэлектрического конструктивного материала каркаса на электрическое поле распределенных зарядов катушки, не были полностью решены даже с помощью упрощенных инженерных расчетов. Так, например, обстоял вопрос с выделением составляющей собственной ёмкости через диэлектрик каркаса и диэлектрическими потерями в каркасном материале. Одна из работ [1] рассматривает распределение тока и напряжения в однослойной катушке и дает расчетную формулу для собственной ёмкости бескаркасной катушки, не упоминая ничего о составляющей через диэлектрик каркаса.

Джексон [2] показал, что эффективное сопротивление катушек, намотанных на каркас, значительно возрастает по сравнению с эффективным сопротивлением подобных бескаркасных катушек.

В этой же работе Джексон предложил формулу для расчета сопротивления ($R_{д.л.}$), вносимого каркасным материалом катушки.

Формула имеет вид:

$$R_{д.н.} = L^2 C_0 \omega^3 \operatorname{tg} \delta, \quad (1)$$

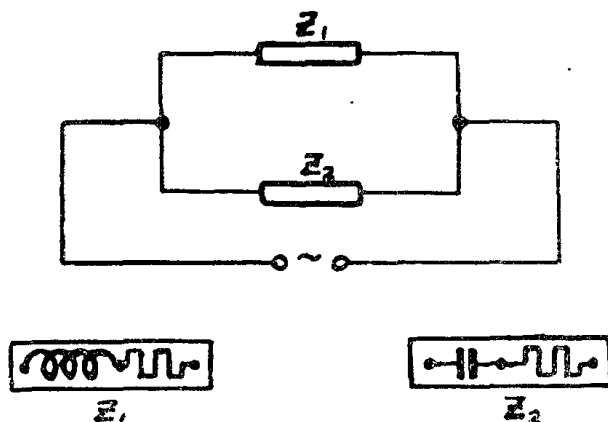
где L — индуктивность катушки,
 C_0 — собственная емкость катушки,
 ω — частота,
 $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь каркасного материала.

Эта формула (1) часто приводится в радиотехнической учебной литературе. Томпсоном [3] получена формула, связывающая добротность катушек с $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала, и на основании этой формулы даны расчетные кривые.

При экспериментальной проверке своей формулы Томпсон обнаружил расхождение с расчетными данными, равное 50%.

В отечественной специальной литературе, вышедшей за последние десять лет, имеются самые противоречивые указания по поводу влияния диэлектрических потерь на добротность КВ и УКВ катушек индуктивности (см., например, [4, 5, 6, 7, 8]).

В 1947 году автором [9] было получено выражение, связывающее добротность катушки с $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала. Формула была выведена с помощью представления катушки индуктивности в виде двухполюсника (фиг. 1), для которого и определялась добротность



Фиг. 1. Эквивалентная схема двухполюсника — катушки

Полученная формула имеет вид:

$$Q = \frac{Q_1 (1 - \omega^2 L C_0)}{1 - \omega^2 L C'_0 + Q_L \omega^2 L C_g \operatorname{tg} \delta - Q_L \omega^4 C'_0 C_g L^2 \operatorname{tg} \delta}, \quad (2)$$

где Q_1 — добротность бескаркасной катушки;
 C_0 — полная емкость катушки, намотанной на каркас;
 C'_0 — емкость бескаркасной катушки;
 C_g — емкость через диэлектрик каркаса;
 L — индуктивность;
 Q_L — добротность безъёмкостной катушки;
 $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь каркасного материала.

Если пренебречь четвертым членом знаменателя (2), то можно получить более удобное выражение для расчета:

$$Q = Q_1(1 - Q_1 \omega^2 Cg L \operatorname{tg} \delta). \quad (3)$$

Выражение (3) справедливо при условии, что $Q_1 \omega^2 Cg L \operatorname{tg} \delta \ll 1$. Тогда же было показано, что для керамических каркасов из ультрафарфора ($\operatorname{tg} \delta$ не больше 0,002) влияние диэлектрических потерь в каркасном материале на добротность катушки незначительно. Однако детальной экспериментальной проверке формула (3) не подвергалась.

Результаты эксперимента

Для экспериментальной проверки формулы (3) было изготовлено две партии катушек на разные диапазоны частот. Первая партия была изготовлена на диапазон $6 \div 20$ мГц с $L = 1,8$ мкГн; вторая партия катушек изготовлена на диапазон $60 \div 80$ мГц. Индуктивность этих катушек была равна 0,2 мкГн.

В первом и втором случаях намотка катушек осуществлялась колым медным проводом. Диаметр провода равнялся 1 мм. Каркасы катушек были изготовлены с нарезкой из органических диэлектриков (полистирол, эбонит и гетинакс).

Выбранные органические диэлектрики представляли интерес как конструктивный материал, из которого достаточно легко можно изготовить каркасы. Кроме того, их диэлектрическая проницаемость (ϵ) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg} \delta$) значительно отличались между собой.

Одновременно с катушками, намотанными на каркасы, были изготовлены бескаркасные катушки, подобные первым.

Катушки без каркаса и с каркасами были изготовлены из одинаковых проводников с точным повторением сечения и других размеров. Потери в проводнике и вносимая ими часть активного сопротивления для каждой партии катушек бескаркасных и на каркасах были одинаковы. Измерение $\operatorname{tg} \delta$ изоляционных материалов и добротности (Q) производилось с помощью куметра. Характеристики использованных изоляционных материалов даны в таблице 1.

Собственная емкость катушек через диэлектрик каркаса определялась по формуле, приведенной в работе [9].

Таблица 1

Название каркасного материала	ϵ	$\operatorname{tg} \delta \times 10^4$ $f = 10 \div 80$ мГц	Примечание
Воздух	1,0	$\approx 1 \cdot 10^{-1}$	*) Исследовалось два сорта полистирола
Полистирол	2,5	$5 \div 8^*)$	
Эбонит	3,2	$45 \div 50$	
Гетинакс	6,0	$700 \div 1000$	

Проверка формулы (3) производилась в диапазоне частот от 6 до 80 мГц. Результаты расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 2.

Из таблицы видно, что измеренное и вычисленное значение добротностей катушек совпадает в пределах до 10%.

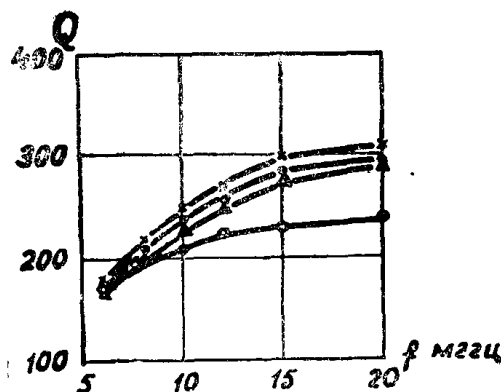
Полученная формула (3) дала возможность оценить влияние диэлектрических потерь каркасного материала на добротность однослойных цилиндрических катушек индуктивности и установить допустимые пределы абсолютных значений $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала. Анализ выражения (3) показывает, что в значительных пределах изменения частоты при ограниченных значениях угла потерь каркасного материала ($\operatorname{tg} \delta < 5 \cdot 10^{-3}$) влияние потерь в диэлектрике каркаса катушки остается малым.

Частотная зависимость добротности катушек приведена на фиг. 2 и 3. Из приведенных фигур следует, что кривые добротности бескаркасных катушек лежат выше кривых добротностей катушек, намотанных на каркасы.

Уменьшение добротности катушек, намотанных на каркасы, по сравнению с бескаркасным объясняется потерями в каркасном материале.

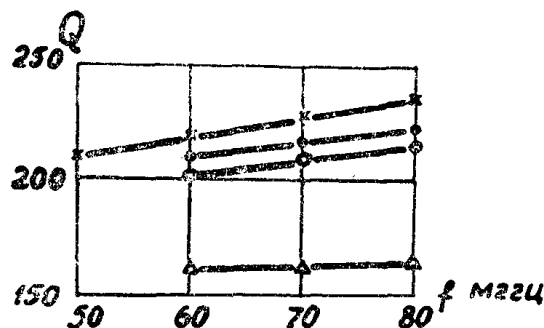
На фиг. 4 дана зависимость добротности катушек от $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала для трех частот (6, 10 и 20 мГц) и на фиг. 5 дана аналогичная зависимость, но только для частоты 60 и 80 мГц.

В рабочем диапазоне частот абсолютное значение добротности какой-либо катушки больше при более высокой частоте. Поэтому



Фиг. 2. Зависимость добротности от частоты для катушек, намотанных на каркасы из различных диэлектриков.

- x — бескаркасная катушка,
- — катушка на каркасе из полистирола,
- o — катушка на каркасе из гетинакса,
- Δ — катушка на каркасе из эбонита



Фиг. 3. Зависимость добротности от частоты для катушек, намотанных на каркасы из различных диэлектриков.

- x — бескаркасная катушка,
- катушка на каркасе из полистирола,
- катушка на каркасе из эбонита,
- Δ — катушка на каркасе из гетинакса

кривые $Q = f(\operatorname{tg} \delta)$, представляющие зависимость добротности от $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала для фиксированных частот, проходят при более высоких частотах в области больших значений Q .

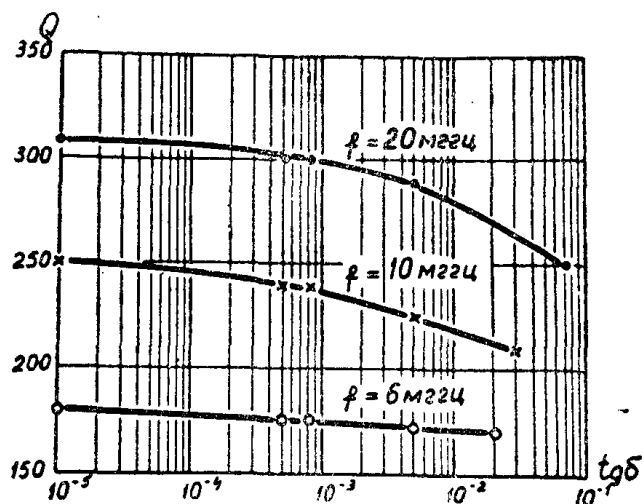
Что же касается более заметного спадания добротности в зависимости от $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала при более высоких частотах-

Таблица 2

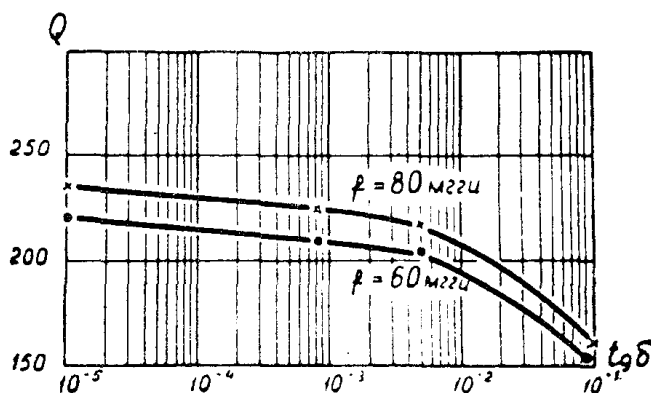
Катушки на полистироловом каркасе				Катушки на эбонитовом каркасе				Катушки на гетинаксовом каркасе				Катушки бескаркасные	
f мггц	добротность		$\frac{\Delta Q}{Q_{\text{изм}}}$ %	f мггц	добротность		$\frac{\Delta Q}{Q_{\text{изм}}}$ %	f мггц	добротность		$\frac{\Delta Q}{Q_{\text{изм}}}$ %	f мггц	добротность
	измер.	вычисл.			измер.	вычисл.			измер.	вычисл.			
6	175	179	3,0	6	172	180	4,5	6	170	176	3,5	6	180
8	210	220	5,0	8	200	219	8,5	8	200	213	6,2	8	220
10	240	249	3,5	10	225	249	9,5	10	210	237	11,5	10	250
12	260	268	3,0	12	254	268	5,5	12	225	243	7,2	12	270
15	290	299	3,0	15	280	298	6,0	15	230	255	10,0	15	300
20	300	309	3,0	20	290	307	5,5	20	240	258	7,0	20	310
60	210	219	5,0	60	205	218	6,0	60	158	169	6,5	60	220
70	215	227	5,5	70	210	226	7,0	70	161	155	4,0	70	228
80	225	235	4,5	80	218	232	6,2	80	162	156	4,0	80	235

(10, 20, 60, 80 мГц), то его можно объяснить частотной зависимостью $\operatorname{tg} \delta$ гетинакса, который и обуславливает это спадание.

Из этих же фигур (4 и 5) и таблицы 2 видно, что добротность катушек, намотанных на каркасы из полистирола и эбонита, мало отличается от добротности бескаркасных катушек ($4 \div 8\%$ при $f = 10 \div 80$ мГц).



Фиг. 4. Зависимость добротности катушек индуктивности от тангенса угла диэлектрических потерь каркасного материала



Фиг. 5. Зависимость добротности катушек индуктивности от тангенса угла диэлектрических потерь каркасного материала.

Значительно отличается добротность катушек, намотанных на гетинаксовые каркасы, от добротности бескаркасных катушек ($16 - 31\%$ при $f = 10 - 80$ мГц). Для иллюстрации на фиг. 6 дана зависимость сопротивления ($R_{д.л.}$), вносимого каркасным материалом, от частоты.

Это сопротивление ($R_{д.л.}$) определялось на основании измерений добротности катушек (бескаркасных и намотанных на каркасы).

Из приведенной фиг. 6 видно, что величина вносимого сопротивления ($R_{д.л.}$) для полистиролового и эбонитового каркасов от частоты

практически не зависит. Для гетинаксового же каркаса наблюдается заметный рост $R_{д.п.}$ с увеличением частоты.

Приведенные нами экспериментальные данные (см. фиг. 4, 5 и табл. 2) показывают, что увеличение $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала до значений $50 \cdot 10^{-4}$ не приводит к уменьшению Q более, чем на 8%.

При выборе каркасного материала для стабильных катушек индуктивности необходимо учитывать, что $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала не должен увеличиваться с частотой в рабочем диапазоне и температурная зависимость его должна быть мала.

В то же самое время часто большее значение имеет не столько абсолютное значение тангенса угла диэлектрических потерь каркасного материала, сколько его удельное влияние [10]. Это удельное влияние потерь пропорционально отношению собственной емкости катушки к общей емкости контура.

При ограниченных значениях угла потерь каркасного материала влияние диэлектрических потерь каркасного материала на добротность однослойных цилиндрических катушек незначительно. Современные конструкции стабильных катушек имеют составляющую собственной

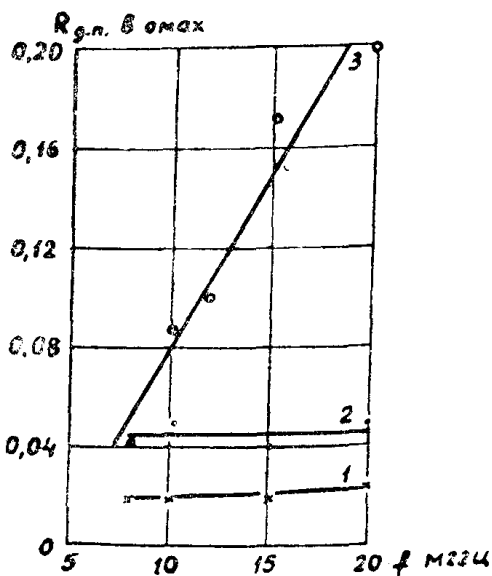
емкости через диэлектрик каркаса порядка $0,5 \text{ пф}$ [9], а тангенс угла диэлектрических потерь каркасных материалов (кварцевое стекло, стеатит, ультрафарфор, цельзиан) лежит в пределах $(3 \div 10) \cdot 10^{-4}$. Кроме этого, следует заметить, что $\operatorname{tg} \delta$ указанных диэлектриков практически не зависит от частоты в рабочем диапазоне катушек, а его температурная зависимость в этом же диапазоне либо отсутствует, либо незначительна (например, $\operatorname{tg} \delta$ кварцевого стекла вплоть до 300°C от температуры не зависит).

Выводы

1. Полученная формула $Q = Q_1 (1 - Q_1 \omega^2 C_g L \operatorname{tg} \delta)$ при условии, что $Q_1 \omega^2 C_g L \operatorname{tg} \delta \ll 1$, дает хорошее совпадение с экспериментальными данными. Измеренное и вычисленное значение добротностей катушек в диапазоне $6 \div 80 \text{ мГц}$ лежит в пределах 10%.

2. Увеличение $\operatorname{tg} \delta$ каркасного материала до значений $50 \cdot 10^{-4}$ не приводит к уменьшению добротности катушек более чем на 8% ($f = 10 \div 80 \text{ мГц}$).

3. Рассмотрение наших экспериментальных данных дает основание считать, что влияние диэлектрических потерь каркасного материала на добротность однослойных цилиндрических катушек можно свести к ничтожно малой величине, если использовать современные неорганические диэлектрики (кварцевое стекло, стеатит, ультрафарфор, цельзиан).



Фиг. 6. Зависимость сопротивления, вносимого каркасным материалом от частоты.

- 1 — катушка на каркасе из полистирола
- 2 — катушка на каркасе из эбонита
- 3 — катушка на каркасе из гетинакса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abd-el Samil Mostafa and Gohar M. K. Определение распределения напряжения, тока и магнитного поля вместе с собственной ёмкостью, индуктивностью и высокочастотным сопротивлением однослойных катушек. Proc. G. R. E, 4, № 4, 537, 1953.
 2. Jackson W. Диэлектрические потери в однослойных катушках на радиочастотах. E. W. W. E. p. 225, 1928.
 3. Thompson A. Влияние каркасного материала на добротность катушек индуктивности. Radio E. E. p. 41, 1945.
 4. Волгов А. В. Детали контуров радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1954.
 5. Пестряков В. Б. и Сачков Д. Д. Конструирование радиодеталей и узлов радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1947.
 6. Евтеев Ф. Е. и Жуков В. А. Технология радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1952.
 7. Сифоров В. И. Радиоприёмные устройства, Военное издательство, 1954.
 8. Сифоров В. И. Радиоприёмники на свч, 1955.
 9. Кессених Р. М., Собственная ёмкость однослойных цилиндрических катушек самоиндукции, Труды НИИИС, вып. 3 (38), 24, 1947.
 10. Сосунов В. Н., Катушки самоиндукции с малым температурным коэффициентом, Известия ВЭТАС, т. XXI, 23, 1940.
-

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
3	11 стр.	10^{16}	10^{-6}
9	9 св.	$5 \cdot 10^{-9}$ сек	$5 \cdot 10^{-9}$ сек
11	1 св.	$2 \div 3 \cdot 10_8$ — сек	$2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек
29	6 стр.	10^{-6} см/сек	10^6 см/сек
29	2 стр.	большой	большин
30	3 св.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
32	6 стр.	спаянности	спайности
33	17 св.	10^{-8} сек	10^{-8} сек
34	3 св.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
34	4,5 св.	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек
34	19 св.	10^{-8} и 10^{-6} см/сек	10^{-8} сек и 10^6 см/сек
56	форм. 9	В конце фигурной скобки следует — 1.	
65	3 стр.	формулу	форму
91	5 св.	1350 ом и $R_T = 30$ ком	$R_T = 1350$ ом $R_T = 30$ ком
107	6 св.	$\tau = 10^{-6}$ сек	$\tau = 10^{-6}$ сек
109	16 стр.	образцов	микротвердости образцов
111	4 стр.	E	$E_{пр}$
112	рис. 9, 5 св.	поле однородное	поле неоднородное
116	12 стр.	Винчелла	Винчелл
123	7 св.	спаянность	спайность
128	32 св.	40 мол %	90 мол %
170	1 св.	ангенса	тангенса
217	15 стр.	При введении примесей типа внедрения	При введении примесей в твердые растворы типа внедрения
218	24 св.	Измерялась зависимость	Определялась зависимость
219	8 св.	хлористый рубидий	бромистый калий
219	22 стр.	хранения из монокристаллов	хранения монокристаллов
220	фиг. 2	В точке начала координат слева по оси lg z следует поставить — 12	
228	1 св.	выражение	выражение
228	5 св.	огда	тогда
228	6 св.	арфора	фарфора
228	7 св.	каркасном	в каркасном
228	8 св.	етальной	детальной
228	16 св.	гатушек	катушек
228	форм. 3	C_g	C_g
242	2 стр.	Из фиг. 1	Из диаграммы плавкости
244	11—12 стр.	рентгенограммы смещения	рентгенограммы сплава смещения
251	24 св.	с ионизованным	с ионизированным
301	7 стр.	монизирующих	ионизирующих
302	18 стр.	-процентного	50-процентного
306	9 стр.	95% монокристалла	95% плотности монокристалла
325	24 стр.	группы	II группы
332	6 стр.	$10^7 - 10^8$ ом/сек	$10^7 - 10^8$ см/сек
343	1 св.	„438—1“	„ИЗВ—1“
394	8 стр.	Co	Co