

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ О ЧЕМ НЕ ПИШУТ В ДОКУМЕНТАЦИИ

М.Красильщиков, В.Смирнов, А.Шалаева 352@giricond.ru

То, что диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков и емкость конденсаторов из сегнетокерамики зависят от постоянного или медленно изменяющегося напряжения, известно давно. Природа этого явления достаточно подробно описана в специальной литературе. Однако данные о фактических изменениях емкости конкретных конденсаторов или других изделий на основе сегнетокерамики практически отсутствуют. Это может привести к ошибкам при проектировании аппаратуры. В последнее время несколько зарубежных изготовителей керамических конденсаторов опубликовали ряд работ, посвященных этой проблеме, и дали конкретные рекомендации по их применению. Разработчики керамических помехоподавляющих проходных конденсаторов и фильтров нижних частот ОАО "НИИ "Гириконд" не остались в стороне и провели соответствующие исследования для своих изделий.

В керамических конденсаторах большой емкости (тип 2) применяются сегнетокерамические материалы на основе титаната бария $BaTiO_3$. Они имеют наиболее высокие значения диэлектрической проницаемости, поэтому номинальная емкость таких конденсаторов велика – более 100 мкФ для некоторых изделий ведущих зарубежных фирм. Но при всех своих достоинствах такие материалы имеют сильную зависимость диэлектрической проницаемости и, как следствие, емкости конденсаторов от температуры и приложенного напряжения постоянного тока. Температурные зависимости емкости, как правило, приводятся в фирменных каталогах, стандартах и технических условиях. Сведения о зависимостях емкости от напряжения можно найти в основном только в специальной литературе и на практике наличие этой зависимости подразумевается "по умолчанию". Такие данные отсутствуют в американской классификации керамических конденсаторов типа 2 (табл.1) и в отечественной системе, но имеются в рекомендациях МЭК (табл.2). Однако в них изменение емкости нормируется только при совместном воздействии напряжения постоянного тока

и температуры, а нормы по изменению емкости в результате воздействия одного лишь напряжения не приводятся.

В последнее время зарубежные изготовители многослойных керамических конденсаторов (MLCC) опубликовали ряд статей, в которых объясняется высокая диэлектрическая проницаемость сегнетокерамических диэлектриков и ее зависимость от постоянного электрического поля, приводятся фактические данные по изменению

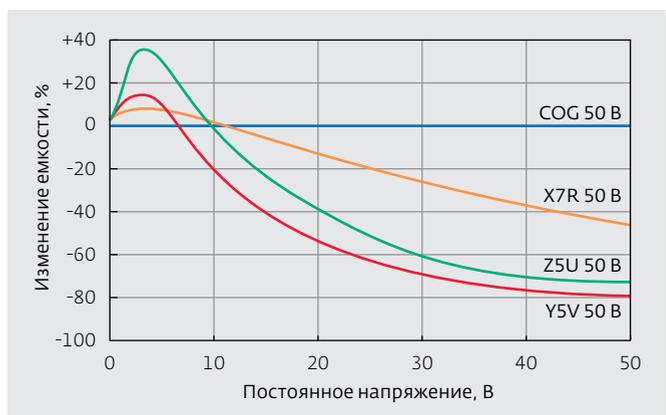


Рис.1. Зависимость емкости MLCC конденсаторов фирмы Murata от напряжения постоянного тока

Таблица 1. Обозначение серий фильтров военного назначения корпорации AVX

Классификационный символ	Обозначение символа и значение величин							
	1-й буквенный	Обозначение	X		Y		Z	
Нижняя рабочая температура, °C		-55		-30		10		
2-й цифровой	Обозначение	2	4	5	6	7		
	Верхняя рабочая температура, °C	45	65	85	105	125		
3-й буквенный	Обозначение	F	P	R	S	T	U	V
	Допустимое изменение емкости, не более, %	±7,5	±10	±15	±22	+22 -33	+22 -56	+22 -82

емкости конденсаторов от приложенного постоянного напряжения и даются рекомендации по их применению с учетом этого явления. Наиболее подробные сведения приводятся в статьях сотрудников японской фирмы Murata – крупнейшего разработчика и производителя керамических конденсаторов [1, 2]. Эти материалы доступны на сайтах некоторых крупных отечественных дистрибьюторов радиокомпонентов. На рис.1 показана зависимость емкости MLCC конденсаторов различных групп температурной стабильности (см. табл.1) от приложенного напряжения постоянного тока [3].

Емкость конденсаторов типа 1 (COG, отечественный аналог – МП0) не зависит от приложенного напряжения, а емкость конденсаторов типа 2 (X7R – H20, Z5U, Y5V – H90) при номинальном напряжении 50 В уменьшается на 45–80%. Для учета такого изменения емкости в реальной аппаратуре фирма разработала специальные интерактивные программные средства, позволяющие рассчитать истинные значения емкости в конкретных режимах электрической нагрузки.

Сегнетокерамические материалы имеют доменную структуру и обладают спонтанной

Таблица 2. Классификация конденсаторов типа 2 согласно рекомендациям МЭК

Обозначение подкласса конденсаторов	Относительное изменение емкости в интервале температур, не более, %		Категория температур, °C				
			-55–125	-55–85	-40–85	-25–85	-10–85
	Без напряжения	Под номинальным напряжением постоянного тока	1	2	3	4	5
2B	±10	10/-15	–	+	+	+	–
2C	±20	20/-30	+	+	+	–	–
2D	20/-30	20/-40	–	–	–	+	–
2E	22/-56	22/-70	–	+	+	+	+
2F	30/-80	30/-90	–	+	+	+	+
2R	±15	15/-40	+	–	–	–	–
2X	±15	15/-25	+	–	–	–	–

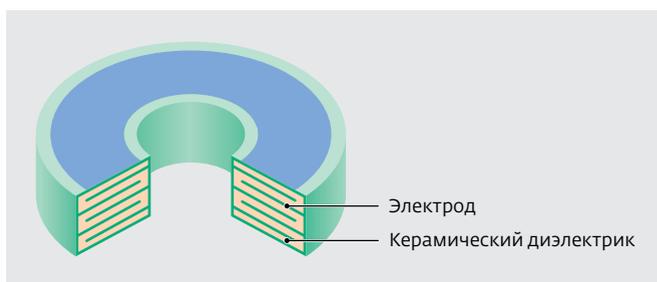
Примечание. Знаком + отмечены предпочтительные группы.

Таблица 3. Зависимость коэффициента нелинейности K от $U/U_{ном}$

Группа ТСЕ	Значения K при напряжении $U/U_{ном}$						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
H20	1,0	1,0	0,94	0,9	0,8	0,7	0,6
H50	1,0	0,97	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4
H90	0,9	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15

поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля. Домены представляют собой макроскопические области, имеющие электрические моменты при отсутствии электрического поля. При этом направление этих моментов у разных доменов различны. Наложение внешнего электрического поля способствует преимущественной ориентации электрических моментов в направлении поля, что создает эффект поляризации. Этим и объясняется высокое значение диэлектрической проницаемости таких материалов. По мере дальнейшего увеличения электрического поля все большее число доменов ориентируется по полю, что приводит к их "зажатию", уменьшению свободного обращения спонтанной поляризации и, соответственно, к снижению диэлектрической проницаемости и емкости конденсаторов. В работах иностранных авторов [1-3] и других эта зависимость называется DC-Bias характеристикой, т.е. характеристикой при смещении постоянным напряжением, хотя такой термин употребляется во многих других случаях, когда постоянное напряжение используется для управления электронными устройствами.

Для характеристики свойств диэлектриков обычно пользуются понятиями статической, реверсивной и начальной диэлектрических

**Рис.2.** Конструкция емкостных элементов фильтров – конденсаторов К10-81**Таблица 4.** Изменение частоты среза фильтров f_c в зависимости от $U/U_{ном}$

Группа ТСЕ	$U/U_{ном}$						
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
H20	1,0	1,0	1,06	1,1	1,25	1,43	1,67
H50	1,0	1,03	1,1	1,25	1,67	2,0	2,5
H90	1,1	1,43	2,0	2,5	3,3	5,0	6,7

проницаемостей. Реверсивная диэлектрическая проницаемость характеризует изменение поляризации сегнетоэлектрика в слабом переменном электрическом поле при одновременном воздействии постоянного поля. На наш взгляд, емкость, измеренную в слабом переменном электрическом поле при одновременном воздействии постоянного поля, также следует называть "реверсивной емкостью" (этим термином мы будем пользоваться далее). Термин "реверсивная емкость сегнетоконденсатора" применял и Д.М.Казарновский [4]. Теория спонтанной поляризации сегнетоэлектриков, в том числе при наличии постоянного поля, достаточно подробно отражена в отечественной научно-технической литературе и, в частности, в монографии [5]. В ОАО "НИИ "Гириконд" разрабатываются и изготавливаются проходные керамические фильтры нижних частот. Конструкции и параметры разработанных в последнее время фильтров Б25 и Б26 достаточно полно приведены в статье [6]. В качестве емкостных элементов фильтров используются многослойные керамические конденсаторы (рис.2). Эти конденсаторы поставляются и как самостоятельные изделия – К10-81 [7].

Конденсаторы К10-81 и фильтры Б25, Б26 имеют четыре группы температурной стабильности емкости (ТСЕ): МП0, Н20, Н50 и Н90. Для группы МП0 применяются несегнетоэлектрические керамические материалы, у которых диэлектрическая проницаемость и емкость не зависят от величины электрического поля. Конденсаторы из сегнетокерамических материалов имеют следующие номинальные напряжения: для группы Н90 – 50, 100 и 250 В, для групп Н20 и Н50 – 50, 100, 160, 250, 350 и 500 В. Реверсивная емкость зависит от напряженности электрического поля в диэлектрике, т.е. от отношения приложенного напряжения к толщине слоя керамики между электродами

(см. рис.2). Конденсаторы с различными номинальными напряжениями имеют различную толщину диэлектрика, но при этом напряженность электрического поля для конденсаторов одной группы ТСЕ остается примерно одинаковой. Реверсивная емкость оценивалась как отношение емкости C , измеренной при подаче напряжения U , к емкости C_0 , измеренной без напряжения. Значения напряжения U выбирались пропорционально номинальному напряжению $U_{ном}$, при этом сохранялась напряженность электрического поля для конденсаторов с различными значениями $U_{ном}$. Как и ожидалось, при одинаковых значениях $U/U_{ном}$ отношения C/C_0 тоже были практически одинаковыми для конденсаторов всех номинальных напряжений одной группы ТСЕ (рис.3, табл.3). По аналогии с диэлектриками будем называть коэффициент K , равный отношению C/C_0 , коэффициентом нелинейности. Он может быть использован разработчиками аппаратуры для оценки фактической емкости конденсаторов К10-81 и фильтров Б25, Б26 при различных рабочих напряжениях постоянного тока аналогично программным средствам фирмы Murata.

Наибольшую зависимость емкости от напряжения имеют конденсаторы группы Н90 из керамического материала с наибольшей диэлектрической проницаемостью. При номинальном напряжении от первоначальной емкости остается всего 15%. С уменьшением диэлектрической проницаемости уменьшается и зависимость емкости от напряжения: при номинальном напряжении для группы Н50 до 0,4, а для для группы Н20 – до 0,6 от первоначального значения.

Фактическая емкость конденсаторов определяет частоту среза (частота, при которой вносимое затухание равняется 3дБ) и вносимое затухание фильтров. Частота среза соответствует соотношению:

$$f_c = \frac{1}{\pi RC}, \quad (1)$$

где f_c – частота среза, Гц; R – сопротивление измерительной системы, Ом; C – емкость фильтра, Ф.

При уменьшении емкости фильтра в соответствии с табл.3 пропорционально увеличивается и частота среза (табл.4).

Приближенный расчет вносимого затухания фильтров С-типа в диапазоне частот помехоподавления от 10 кГц до 100 МГц при значениях

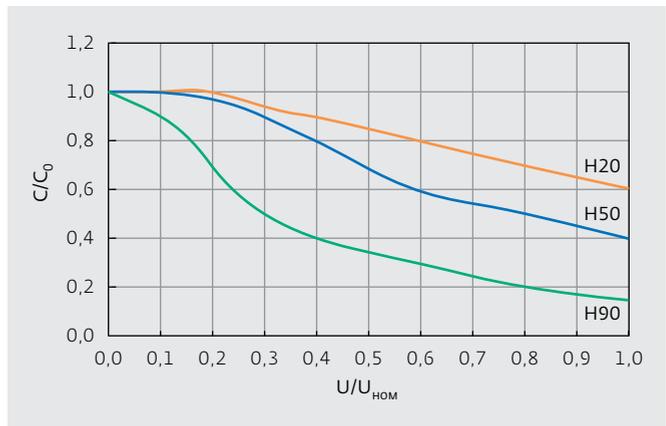


Рис.3. Зависимость коэффициента нелинейности K от $U/U_{ном}$ для конденсаторов К10-81 различных групп ТСЕ

вносимого затухания до 60 дБ можно производить по формуле:

$$A = 20 \lg \sqrt{1 + (0,5\omega RC)^2}, \quad (2)$$

где A – вносимое затухание, дБ; ω – круговая частота, c^{-1} ; R – сопротивление измерительной схемы, Ом; C – фактическая емкость фильтра, Ф.

В нашем случае для диапазона номинальных емкостей фильтров групп Н20, Н50, Н90 при частотах 1,0 МГц и выше единицей в подкоренном выражении можно пренебречь, фактическая емкость будет равняться KC_0 и тогда

$$A = 20 \lg(\pi f K R C_0). \quad (3)$$

Измерения вносимого затухания фильтров под нагрузкой постоянным напряжением проводились в соответствии с ГОСТ 13661-92 [8] при несимметричной схеме без рабочего тока методом отношения напряжений с номинальным входным сопротивлением схемы 50 Ом. Измерения проводились в специальном контейнере с помощью современного компьютеризированного измерителя комплексных коэффициентов передачи "Обзор-103". Постоянное напряжение подавалось на фильтр от отдельного источника через рекомендованные ГОСТ разделительные устройства. Однако при этом сигнал проникал, помимо фильтра, через цепь разделительных устройств-источник напряжения, что привело к снижению измеренных величин вносимого затухания относительно фактических значений. Кроме этого, верхняя граница частоты измерения ограничивалась 50-100 МГц вместо 1300 МГц, позволяемых измерителем. Значения вносимого затухания

Таблица 5. Зависимость вносимого затухания фильтров Б26-1, Н90, $U_{\text{ном}}=50$ В, $C_0=1,0$ мкФ при различных значениях постоянного напряжения

Номинальная емкость	Вносимое затухание, дБ, не менее на частоте, МГц							
	0,01	0,1	1	10	30	100	300	1000
68 пФ	–	–	–	–	–	2	5	10
100 пФ	–	–	–	–	–	3	10	20
150 пФ	–	–	–	–	2	8	15	21
220 пФ	–	–	–	–	3	10	17	22
330 пФ	–	–	–	–	3,5	11	20	24
470 пФ	–	–	–	–	4	12	22	27
680 пФ	–	–	–	5	10	15	25	35
1000 пФ	–	–	–	6	15	20	30	40
1500 пФ	–	–	–	7	16	22	32	40
2200 пФ	–	–	2	9	17	25	33	40
3300 пФ	–	–	3	12	20	30	35	40
4700 пФ	–	–	3	15	25	35	40	45
6800 пФ	–	–	3	20	25	35	40	45
0,01 мкФ	–	–	4	23	30	40	45	55
0,015 мкФ	–	–	4	24	31	41	46	56
0,022 мкФ	–	–	4,5	25	32	42	48	58
0,033 мкФ	–	–	6	30	35	45	50	58
0,047 мкФ	–	–	8	33	40	45	50	60
0,068 мкФ	–	3	10	35	40	45	50	60
0,1 мкФ	2	8	25	40	45	50	55	60
0,22 мкФ	3	10	28	43	48	52	58	65
0,33 мкФ	4	12	30	45	52	55	58	65
0,47 мкФ	6	14	33	50	53	58	65	70
0,68 мкФ	7	15	35	50	55	60	65	70
1,0 мкФ	9	25	45	53	58	62	65	70
1,5 мкФ	12	25	45	54	60	65	65	70
2,2 мкФ	15	26	45	55	60	65	67	70
3,3 мкФ	18	30	45	56	60	68	69	70
4,7 мкФ	20	33	50	60	65	70	70	70
6,8 мкФ	25	40	51	65	70	70	70	70
10,0 мкФ	30	45	55	67	70	70	70	70

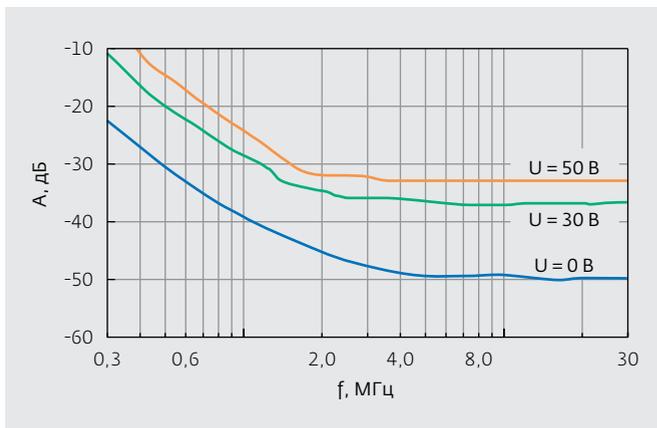


Рис.4. Частотная зависимость вносимого затухания фильтров Б26-1, Н90, $U_{\text{ном}} = 50$ В, $C_0 = 1,0$ мкФ при различных значениях постоянного напряжения

оказались существенно ниже, чем при измерении в отсутствие источника напряжения, и служат только для иллюстрации влияния постоянного напряжения на помехоподавляющие свойства фильтров. При этом соблюдалось соотношение (3). Для фильтров группы Н50 характер зависимости изменялся слабее, а для группы Н20 – практически не изменялся (рис.4).

В технических условиях на фильтры Б25, Б26 приводятся таблицы, содержащие значения вносимого затухания в зависимости от номинальной емкости и частоты (табл.5).

При применении этих фильтров на постоянном напряжении можно в соответствии с рабочим напряжением найти коэффициент нелинейности K по табл.3, определить фактическое значение емкости $C_{\text{факт}} = KC_{\text{ном}}$ и по табл.5 (или другим имеющимся в ТУ таблицам) оценить реальную частотную зависимость вносимого затухания.

Следует иметь в виду, что в ТУ на фильтры значения вносимого затухания A на различных частотах указаны для измерительной системы с сопротивлениями источник-нагрузка, равными 50 Ом. В реальной аппаратуре сопротивления систем, как правило, отличаются от этой величины. Для пересчета значений A для системы с сопротивлениями, отличными от 50 Ом, можно воспользоваться формулой [6]:

$$A = 20 \lg \left[1 + \frac{Z_s Z_1}{Z_t (Z_s + Z_1)} \right], \quad (4)$$

где Z_s – внутреннее сопротивление источника; Z_1 – полное сопротивление нагрузки; Z_t – передаточное сопротивление, определяемое по графику

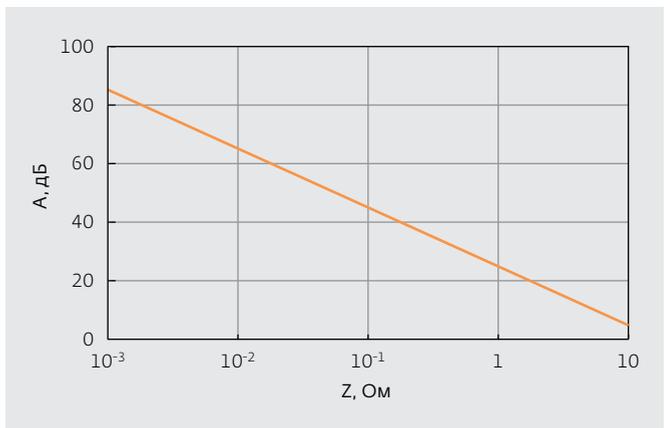


Рис.5. Зависимость передаточного сопротивления Z_t в 50-омной системе

(рис.5) для значения затухания в 50-омной системе.

* * *

Подводя итог, можно сказать, что при работе проходных керамических конденсаторов К10-81 и фильтров Б25, Б26 в цепях постоянного тока их емкость и помехоподавляющие свойства могут меняться, особенно у изделий группы температурной стабильности Н90. Это необходимо учитывать при выборе конденсаторов и фильтров для конкретных условий применения, используя либо программные продукты Murata, либо пользуясь более простыми методиками, описанными выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mark D. Waugh.** Design solutions for DC bias in multilayer ceramic capacitors. – Electronic Engineering Times Europe, August, 2010.
2. **Hidei Fujii.** New Ceramic Capacitor Takes on Noise. Smoothing of LED Bulbs. – AEI, February, 2011.
3. FAQ of Monolithic Ceramic Capacitors, What is DC characteristic? – www.murata.com
4. **Казарновский Д.М.** Сегнетокерамические конденсаторы. – М.: Госэнергоиздат, 1956.
5. **Ротенберг Б.А.** Керамические конденсаторные диэлектрики. – Санкт-Петербург, 2000.
6. **Красильщиков М., Смирнов В., Шалаева А.** Керамические проходные ФНЧ с малыми потерями. – Электроника: НТБ, 2009, №№7, 8.
7. **Красильщиков М., Смирнов В., Шалаева А.** Новые керамические помехоподавляющие конденсаторы. – Компоненты и технологии, 2010, №7.
8. ГОСТ 13661-92. Пассивные помехоподавляющие фильтры и элементы. Методы измерения вносимого затухания.