

# НОВЫЕ ОПОРНЫЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В.Смирнов, к.т.н.<sup>1</sup>, А.Шалаева<sup>2</sup>, А.Харитонов<sup>3</sup>

УДК 621.38  
БАК 05.27.00

АО "НИИ "Гириконд", входящее в состав холдинга "Российская электроника", – базовое предприятие радиоэлектронного комплекса России в области конденсаторов и нелинейных полупроводниковых резисторов. Институт является ведущим разработчиком помехоподавляющих фильтров и конденсаторов. Здесь разрабатываются и производятся электронные компоненты, датчики и приборы как универсального применения, так и уникальные изделия для специфических и экстремальных условий эксплуатации (для СВЧ-диапазона частот, работы при повышенных температурах и механических нагрузках и др.), а также материалы для них. Новые керамические опорные помехоподавляющие конденсаторы отличаются низкими значениями собственной индуктивности, имеют широкую линейку напряжений (250, 500, 750 и 1000 В) и емкостей (от 4,7 пФ до 0,33 мкФ), резонансная частота составляет от 4,4 до 1100 МГц, значения вносимого затухания достигают 60 дБ.

## ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ: ТРЕБОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ

Обеспечение помехоустойчивости – одна из основных проблем при проектировании радиоэлектронных устройств. Ее особая актуальность обусловлена широким применением источников вторичного электропитания, которые могут служить генераторами высокочастотных помех. Применение высокоскоростных цифровых устройств также приводит к возрастанию частоты помех. Если раньше требования к максимальной частоте помехоподавления составляли не более 50 МГц, то теперь уве-

личены до 100 МГц и выше. Наиболее опасными являются кондуктивные помехи, распространяющиеся в проводящих цепях питания, управления, коммутации.

Для устранения таких помех применяются блокировочные конденсаторы, предназначенные для замыкания их на корпус аппаратуры, "землю". Опорными называются помехоподавляющие конденсаторы, в конструкции которых есть опорный вывод, обеспечивающий малую индуктивность соединения одного из электродов конденсатора с корпусом аппаратуры. Опорные конденсаторы отличаются от аналогичных устройств лишь конструкцией и некоторыми дополнительными требованиями к электрическим параметрам (эквивалентному последовательному сопротивлению и частоте помехоподавления).

<sup>1</sup> АО "НИИ "Гириконд", vladfs2014@yandex.ru.

<sup>2</sup> АО "НИИ "Гириконд", 352@giricond.ru.

<sup>3</sup> АО "НИИ "Гириконд", kharitonovbonch@gmail.com.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) полного сопротивления ( $Z$ ) конденсаторов (рис.1) имеет U-образную форму, в левой ветви которой  $Z$  уменьшается пропорционально частоте и достигает минимального значения на частоте собственного последовательного резонанса  $f_{рез}$ . На этой частоте величины емкостного и индуктивного реактивных сопротивлений одинаковы и противоположны по знаку, а результирующее реактивное сопротивление равно нулю. На частоте собственного последовательного резонанса общий импеданс будет равен **эквивалентному последовательному сопротивлению ( $R_{эпс}$ )**. На частотах ниже частоты последовательного резонанса  $Z$  определяется емкостью, а выше – индуктивностью, увеличиваясь пропорционально частоте. Для устранения кондуктивных помех их (помехи) по цепям распространения нужно накоротко замкнуть по переменному току на заземленный корпус. Но наличие в цепи **конденсаторов** активного сопротивления  $R_{эпс}$  **не позволяет этого сделать. По этой причине минимально достижимые значения эквивалентного последовательного сопротивления – одно из главных требований к опорным помехоподавляющим конденсаторам.**

Достижение максимальной частоты помехоподавления зависит от значений частоты собственного последовательного резонанса  $f_{рез}$  и собственной индуктивности  $L$ , определяемых конструкцией электродов и выводов конденсатора. Для повышения частоты  $f_{рез}$  необходимо обеспечить минимально возможные значения индуктивности. Для оценки параметра помехоподавления обычно используются термины "ослабление" или "вносимое затухание". В настоящей статье предпочтение отдано второму варианту. Вносимое затухание соответствует ослаблению электрического сигнала переменного тока, вызванному включением конденсатора в электрическую схему.

Значение вносимого затухания ( $A$ , дБ) вычисляют по формуле:

$$A = 20 \lg U_1 / U_2, \quad (1)$$

где  $U_1$  – напряжение в цепи без конденсатора,

$U_2$  – напряжение с установленным конденсатором.

Разработка помехоподавляющих конденсаторов в НИИ "Гириконд" началась с 1950-х годов. Были созданы дисковые керамические опорные конденсаторы КДО, трубчатые опорные конденсаторы КО, другие опорные конденсаторы с органическим диэлектриком. Конденсаторы КО, КДО до последнего времени выпускались заводом "Номинал" на Украине и использовались на ряде предприятий России. В связи с прекращением поставок встал вопрос об их замещении. Конденсаторы КДО имеют металлический фланец с резьбовой шпилькой (опорный вывод), на котором размещен емкостной элемент в виде однослойного керамического дискового диэлектрика. Максимальная номинальная емкость КДО равняется 2200 пФ. В случае такой емкости нижняя граница диапазона частот помехоподавления, при которой вносимое затухание равняется 3 дБ (частота среза), составляет 2,9 МГц. Максимальная номинальная емкость конденсаторов КО также небольшая – 4700 пФ, поэтому они не могут обеспечить эффективное помехоподавление в области низких частот. В этом диапазоне частот с такой задачей справляются опорные конденсаторы с органическим диэлектриком К73-57, однако у них большая собственная индуктивность, ограничивающая помехоподавление в высокочастотной области. На частоте 100 МГц вносимое затухание составляет всего 10 дБ (рис.2).

В конце 1950-х – начале 1960-х годов в конструкциях и технологии изготовления керамических конденсаторов произошли принципиальные изменения. Были разработаны методы литья тонких керамических пленок, с применением которых создан новый тип керамических конденсаторов – многослойные. Максималь-

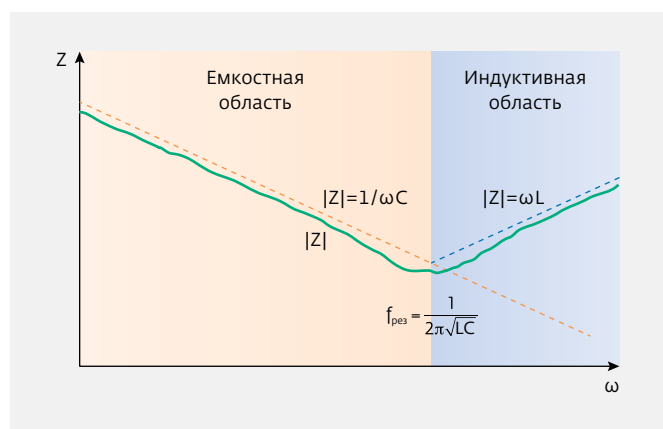


Рис.1. АЧХ опорных конденсаторов

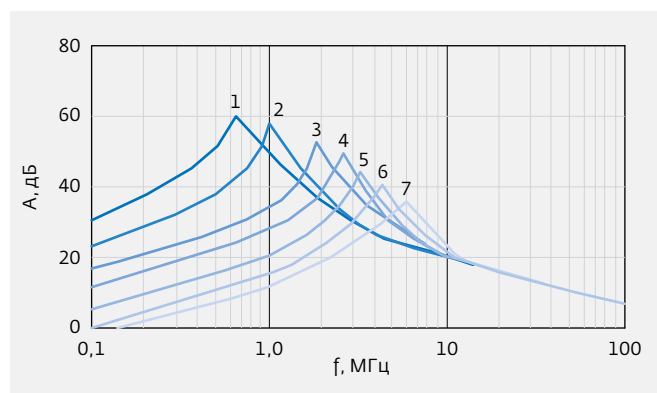


Рис.2. АЧХ конденсаторов К73-57; зависимости:  
1 – 4,7 мкФ; 2 – 2,2 мкФ; 3 – 1,0 мкФ; 4 – 0,47 мкФ;  
5 – 0,22 мкФ; 6 – 0,1 мкФ; 7 – 0,047 мкФ

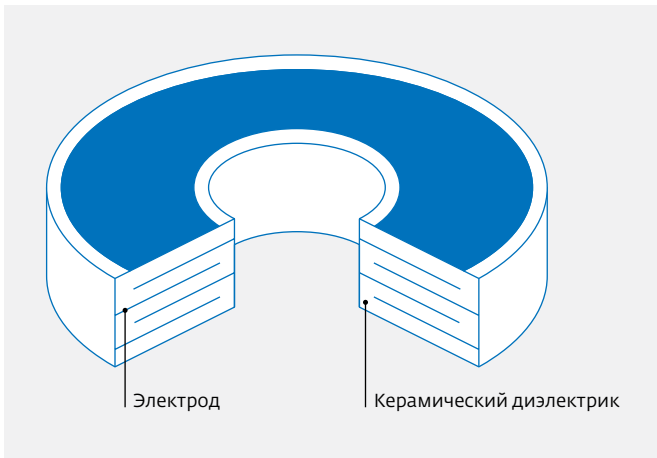


Рис.3. Конструкция шайбовых конденсаторов

ная и удельная емкость таких конденсаторов по сравнению с однослойными увеличилась в тысячи раз. Наибольшее распространение получили конденсаторы для поверхностного монтажа, имеющие форму параллелепипеда (чип-конденсаторы). Такие устройства могут применяться и как блокировочные, например конденсаторы К10-67В-500 В-0,022 мкФ размером 5,7×5,0×3,0 мм в цепях с источниками вторичного электропитания. Спустя время появились помехоподавляющие шайбовые конденсаторы (рис.3).

Таблица 2. Шкала номинальных емкостей конденсаторов К10-85

U <sub>ном</sub> , В	Группа ТСЕ		
	МПО	Н20	Н50
	C <sub>ном</sub>		
250	4,7-470 пФ	680 пФ-0,01 мкФ	0,01; 0,015 мкФ
500	470-680 пФ	3 300 пФ-0,033 мкФ	0,033; 0,047 мкФ
	1 000 пФ	0,047; 0,068 мкФ	0,068; 0,1 мкФ
	1 500; 2200 пФ	0,1; 0,15 мкФ	0,15; 0,22 мкФ
	3 300; 4700 пФ	0,22 мкФ	0,33 мкФ
750	47-330 пФ	-	-
	470-1 000 пФ	-	-
	1 500 пФ	-	-
	2 200 пФ	-	-
1000	100-220 пФ	-	-
	330 пФ	-	-
	470 пФ	-	-

Таблица 1. Основные размеры конденсаторов К10-85

S <sub>max</sub>	D <sub>max</sub>	L <sub>max</sub>	D <sub>1max</sub>	Масса, г, не более
12,0	13,8	12,0	9,5	5,5
14,0	16,4		11,5	7,0
		14,0	13,5	9,0

Чередующиеся слои керамического диэлектрика и электродов конденсаторов, отдельные слои которых соединены параллельно, образуют емкость между внутренней и внешней контактными поверхностями. Благодаря данной конструкции можно получать значения емкости от единиц пикофард до нескольких десятков микрофард [1]. В иностранных каталогах [2, 3] такие конденсаторы называют в основном Multilayer Discoidal Capacitors, а в отдельных источниках отечественной технической литературы – "дискоидальными". В соответствии с конструкцией мы называем такие конденсаторы шайбовыми. Устройства применяются как самостоятельные помехоподавляющие элементы, так и в составе фильтров низкой частоты [4].

Коаксиальная конструкция и параллельное соединение внутренних электродов обеспечивают минимальные значения собственной индуктивности и максимальную частоту собственного резонанса.

### МАЛОИНДУКТИВНЫЕ ОПОРНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ К10-85

**Конструкция конденсаторов.** Малоиндуктивные опорные конденсаторы К10-85 (рис.4) были разработаны с использованием преимуществ шайбовых конденсаторов. Устройства номинальным напряжением 250, 500, 750 и 1000 В, их корпуса выполнены из латуни с покрытием серебром. Корпус с резьбой служит опорным выводом. Конструкции и основные размеры конденсаторов приведены в табл.1 и на рис.5, 6. Типоразмеры, группы температурной стабильности (ТСЕ) и номинальные емкости представлены в табл.2. Материалы группы ТСЕ Н90 для конденсаторов



Рис.4. Внешний вид конденсаторов К10-85

не использовались из-за высокой их нестабильности при воздействии температуры и рабочего напряжения.

**Параметры помехоподавления.** Вносимое затухание конденсаторов А в диапазоне частот от 0,3 до 1300 МГц определялось с помощью измерителей комплексных коэффициентов передач "Обзор-103" и в диапазоне частот от 0,3 до 3200 МГц – "Обзор-304". Эти приборы предназначены для измерения комплексных S-параметров, из которых вносимому затуханию соответствует коэффициент передачи  $S_{21}$ . АЧХ вносимого затухания конденсаторов с минимальным и максимальным значениями номинальной емкости приведены на рис.7 и 8.

Частота среза АЧХ, при которой вносимое затухание А равняется 3 дБ, точно соответствует соотношению:

$$F_c = 1/\pi RC, \tag{2}$$

где  $F_c$  – частота среза, Гц;

$R$  – сопротивление измерительной системы, 50 Ом;

$C$  – емкость конденсатора, Ф.

Значения  $F_c$  составляют от 20 кГц для емкости 0,33 мкФ и до 900 МГц для емкости 4,7 пФ. На частотах до резонансной частоты вносимое затухание увели-

чивается (крутизна около 20 дБ/декаду). Значения  $f_{рез}$  находятся в пределах от 4,4 до 1150 МГц. После резонансной частоты вносимое затухание начинает уменьшаться с такой же крутизной – около 20 дБ/декаду. При этом минимальные значения вносимого затухания составляют 8–12 дБ на частоте 1,4 ГГц. На более высокой частоте вносимое затухание увеличивается до 20 дБ. Таким образом, полоса помехоподавления по сравнению с конденсаторами К73-57 (до 20 МГц) была существенно расширена.

На основании измеренных АЧХ были рассчитаны значения эквивалентного последовательного сопротивления  $R_{эпс}$  и собственной индуктивности ( $L = 3,5-4,5$  нГн). Значения  $L$  изменяются на 0,2–0,3 нГн/мм в зависимости от расстояния до подключения вывода конденсаторов. Значения резонансной частоты и вносимого затухания в технических условиях представлены в табл.3. Так как фактические значения емкости конденсаторов отличаются от их номинального значения в пределах допустимого отклонения, изменяются и значения резонансных частот. Поэтому значения резонансной частоты  $f_{рез}$  были пересчитаны для номинального значения емкости по формуле:

$$f_{рез} = f_{рез.изм.} \sqrt{\frac{C_{ф}}{C_{ном}}}, \tag{3}$$

где  $f_{рез.изм.}$  – измеренное значение резонансной частоты,

$C_{ф}$  – фактическое значение емкости,

$C_{ном}$  – номинальное значение емкости.

Формула справедлива, так как собственная индуктивность конкретного измеренного конденсатора оставалась постоянной. Вместе с указанием резонансной частоты  $f_{рез}$  в табл.3 приводятся значения вносимого затухания на этой частоте.

Для проверки возможного расширения полосы помехоподавления было опробовано параллельное соеди-

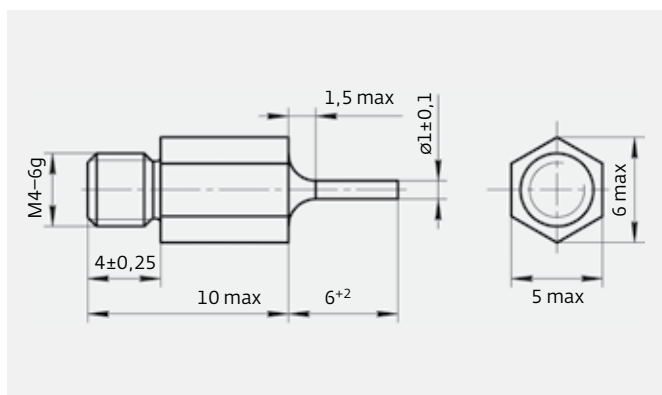


Рис.5. Конструкция и размеры конденсаторов с номинальным напряжением 250 В

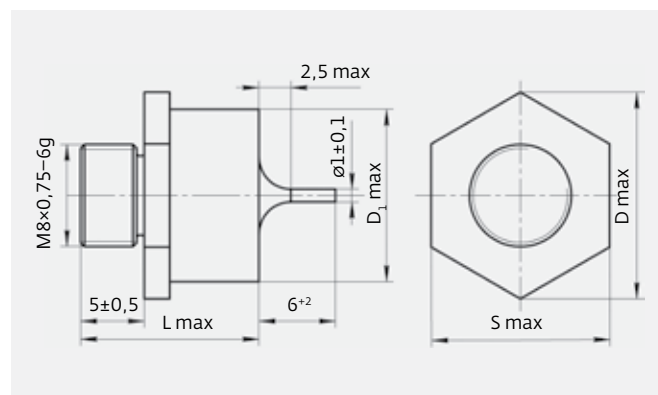


Рис.6. Конструкция и размеры (см. табл.1) конденсаторов с номинальным напряжением 500, 750 и 1000 В

Таблица 3. Резонансная частота и вносимое затухание конденсаторов К10-85

C <sub>ном</sub>	f <sub>рез</sub> , МГц	A <sub>рез</sub> , дБ	Вносимое затухание A, дБ, на частоте f, МГц							
			0,3	1	5	10	50	100	500	1000
4,7 пФ	1100	30	-	-	-	-	-	-	3	30
6,8 пФ	850		-	-	-	-	-	-	4	25
10,0 пФ	680		-	-	-	-	3	10	25	15
15,0 пФ	560		-	-	-	-	5	15	28	14
22,0 пФ	460	35	-	-	-	-	7	20	33	12
33,0 пФ	420		-	-	-	-	3	15	30	10
47,0 пФ	370		-	-	-	-	-	3	25	
68,0 пФ	290		-	-	-	-	-	3	20	
100,0 пФ	240	40	-	-	-	-	-	5	20	
150,0 пФ	200		-	-	-	-	3	10	26	
220,0 пФ	155		-	-	-	-	7	16	10	
330,0 пФ	125		-	-	-	-	10	35	15	
470,0 пФ	110	45	-	-	-	3	15	45	12	8
680,0 пФ	92		-	-	-	5	20	45		
1000 пФ	82		-	-	-	10	20	43		
1500 пФ	69		-	-	-	15	25	35		
2200 пФ	58		-	-	3	20	45	30	10	
3300 пФ	44		-	-	5	18	43	28		
4700 пФ	36		-	-	10	12	35	22		
6800 пФ	30		-	-	13	15	25	20		
0,01 мкФ	23	-	3	14	18	28				
0,015 мкФ	19	-	3	15	20	25				
0,022 мкФ	15	50	0,5	10	30	35	25	20	10	8
0,033 мкФ	13		2	13	32	48				
0,047 мкФ	10,5		5	18	35	50				
0,068 мкФ	8,4	55	9	22	35	48	20	20	10	8
0,1 мкФ	6,5		14,5	25	41	44				
0,15 мкФ	6,2		16	30	48	43				
0,22 мкФ	5,5	60	19	20	55	35	20	20	10	8
0,33 мкФ	4,4		22	32	58					

Таблица 4. Допустимые реактивные параметры конденсаторов К10-85

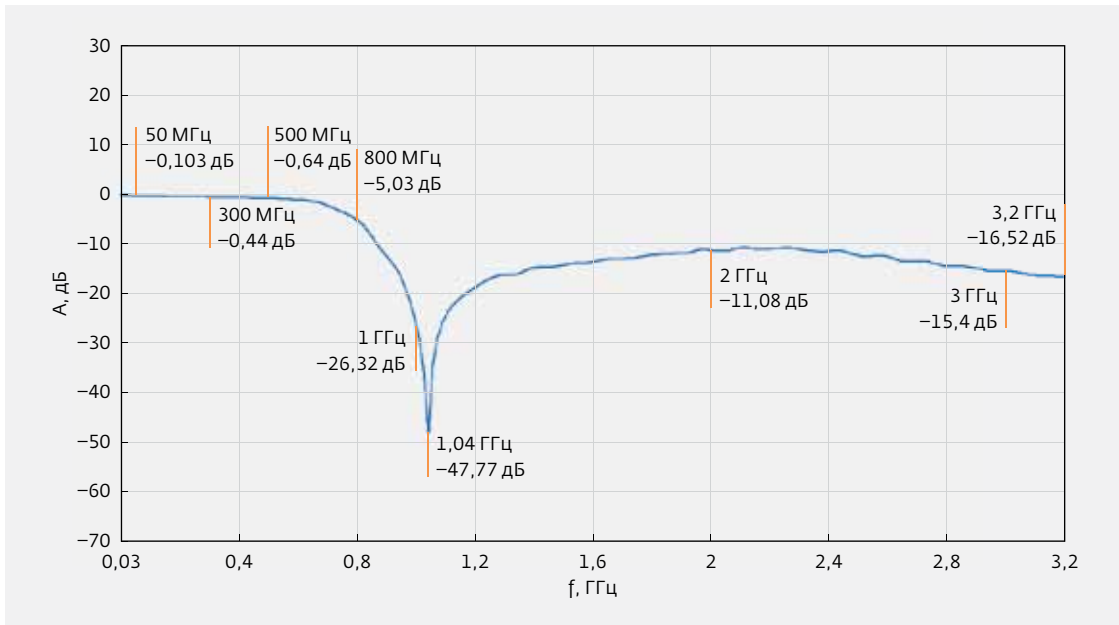
U <sub>ном</sub> , В	Типоразмер	P <sub>доп</sub> , Вар (Н20, Н50)	I <sub>доп</sub> , А (МП0)	f <sub>0</sub>
250	-	1,0	0,2	0,0065/С
500, 750, 1000	1	2,0	0,4	0,015/С
	2	2,5	0,6	0,025/С
	3	3,0	0,8	0,035/С
	4	3,0	0,8	0,035/С

нение двух опорных конденсаторов – разной емкости, с разнесенными частотами собственного резонанса. АЧХ параллельно соединенных конденсаторов К10-85 номинальной емкостью 0,33 мкФ и 150 пФ приведена на рис.9.

Предполагалось, что конденсатор большей емкости и с меньшей частотой собственного резонанса обеспечит низкое значение полного сопротивления Z в низкочастотной области. И наоборот, конденсатор меньшей емкости и с большей частотой собственного резонанса – низкое значение Z в высокочастотной области требуемого помехоподавления.

Однако предположение подтвердилось не полностью. Конденсатор емкостью 0,33 мкФ находится в индуктивной области, параллельно подключенный конденсатор емкостью 150 пФ – в емкостной. У образовавшегося таким образом колебательного контура на параллельном резонансе с частотой 104,9 МГц резко увеличилось полное сопротивление Z, что отразилось на АЧХ вносимого затухания (см. рис.9). Такое соединение опорных конденсаторов разной емкости может применяться при формировании полосы помехоподавления с заданной АЧХ.

Результат эксперимента был проверен расчетным путем: определена частота резонанса параллельного соединения конденсаторов с помощью формул (4) и (5).



**Рис.7.** АЧХ конденсаторов К10-85, МПО, 4,7 пФ, 250 В

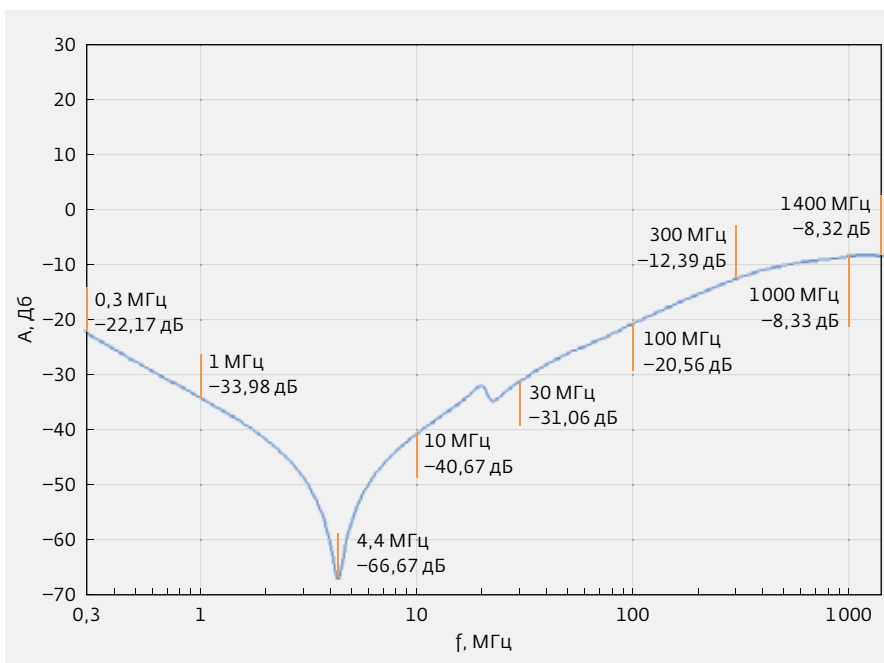
Результаты АЧХ (см. рис.9) и рассчитанные по формуле (5) практически совпали.

$$|Z| = \frac{|Z_1||Z_2|}{|Z_1+Z_2|}, \quad (4)$$

где  $|Z|$  – комплексное сопротивление параллельного соединения конденсаторов;  
 $|Z_1|$  и  $|Z_2|$  – комплексные сопротивления первого и второго конденсаторов соответственно.

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1+L_2)\left(\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\right)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(6,36 \text{ нГн}+7,78 \text{ нГн})\left(\frac{0,296 \text{ мкФ}\cdot 134 \text{ пФ}}{0,296 \text{ мкФ}+134 \text{ пФ}}\right)}} = 115,69 \text{ МГц}, \quad (5)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – фактические индуктивности первого и второго конденсаторов соответственно,  $C_1$  и  $C_2$  – фактические емкости первого и второго конденсаторов соответственно.



**Рис.8.** АЧХ конденсаторов К10-85, Н50, 0,33 мкФ, 250 В

**Допустимые реактивные параметры.** Предельно допустимые значения реактивных параметров в режимах переменного напряжения необходимы для определения допустимого рабочего переменного напряжения  $U_{раб}$ . При этих значениях  $U_{раб}$  температура поверхности конденсаторов не должна превышать температуру окружающей среды более чем на 5°C, а параметры конденсатора должны оставаться в пределах нормы. Для определения этих параметров температура корпуса конденсаторов измерялась в различных режимах нагрузки переменным током на частотах от 300 Гц до 200 кГц. Керамический диэлектрик группы МПО имеет низкие диэлектрические потери ( $tg\delta=0,0001$ –

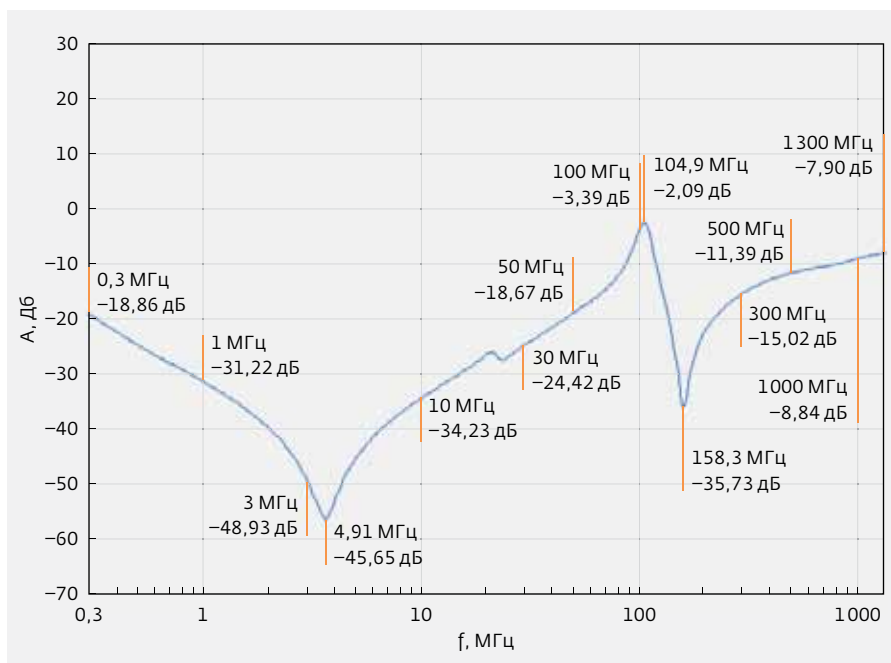


Рис.9. АЧХ параллельно соединенных конденсаторов 150 пФ и 0,33 мкФ

0,001), и конденсаторы этой группы ТСЕ нагревались только за счет нагрева реактивным током  $I_p$  металлических частей конденсатора. Нагрев конденсаторов групп Н20, Н50 происходит за счет диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta=0,005-0,02$ ) при реактивной мощности  $P_p$ . Однако на определенной частоте  $f_0$  потери в металле сравниваются с потерями в диэлектрике, а при более высоких частотах – превосходят их. Поэтому на частотах  $>f_0$  допустимые значения  $P_p$  и  $I_p$  необходимо снижать пропорционально отношению  $f/f_0$ . На основании анализа полученных данных определены предельно допустимые значения

реактивных мощности и тока, а также формула для расчета  $f_0$  при разных значениях емкости  $C$  (табл.4).

\*\*\*

Новые керамические опорные помехоподавляющие конденсаторы, разработанные в АО "НИИ "Гириконд", удовлетворяют основным требованиям обеспечения помехоустойчивости радиоэлектронных устройств, отличаются низкими значениями собственной индуктивности, для них характерна широкая линейка напряжений и емкостей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Красильщиков М., Смирнов В., Шалаева А. Новые керамические помехоподавляющие конденсаторы // Компоненты и технологии. 2010. № 7. С. 60–63.
2. Ceramic capacitors. Каталог фирмы Eurofarad. Франция.
3. Discoidal capacitors. Каталог фирмы Syfer. Англия.
4. Красильщиков М., Смирнов В., Шалаева А. Керамические проходные фильтры нижних частот с малыми потерями // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7. С. 28–32, № 8. С. 22–26.
5. Патент на полезную модель № 158534. Керамический опорный помехоподавляющий конденсатор. Авторы: Смирнов В.Ф., Шалаева А.А., Кузьмичев З.В. Приоритет полезной модели от 23 июня 2015 года.
6. Конденсаторы керамические помехоподавляющие К10-85, технические условия АДПК.673511.019 ТУ.