

НОВЫЕ ОПОРНЫЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В.Смирнов, к.т.н.¹, А.Шалаева², А.Харитонов³

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).

¹ АО "НИИ "Гириконд", vladfs2014@yandex.ru.

² АО "НИИ "Гириконд", 352@giricond.ru.

³ 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-

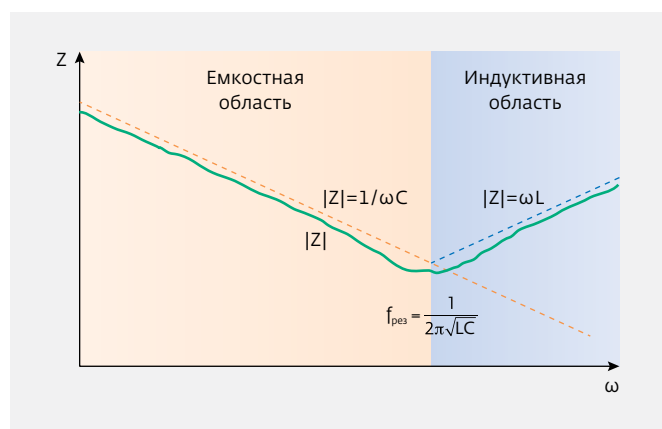


Рис.1. АЧХ опорных конденсаторов

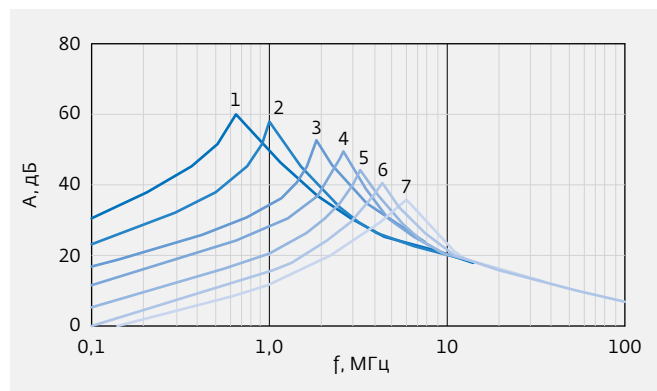


Рис.2. АЧХ конденсаторов К73-57; зависимости: 1 – 4,7 мкФ; 2 – 2,2 мкФ; 3 – 1,0 мкФ; 4 – 0,47 мкФ; 5 – 0,22 мкФ; 6 – 0,1 мкФ; 7 – 0,047 мкФ

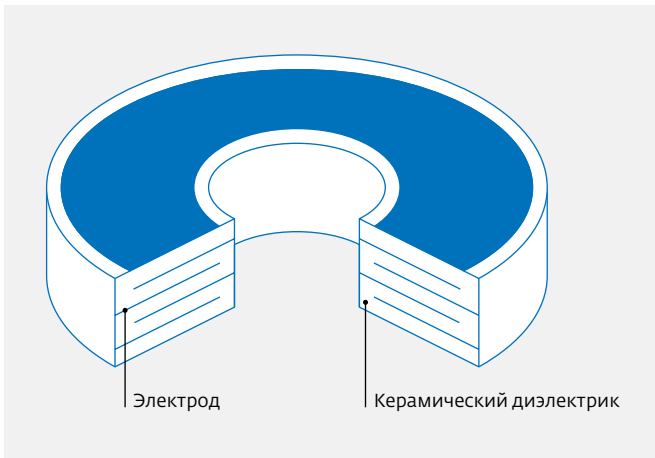


Рис.3. Конструкция шайбовых конденсаторов

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 _{ном} , В	Группа ТСЕ		
	МПО	Н20	Н50
	C _{ном}		
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 _{max}	D _{max}	L _{max}	D _{1max}	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-

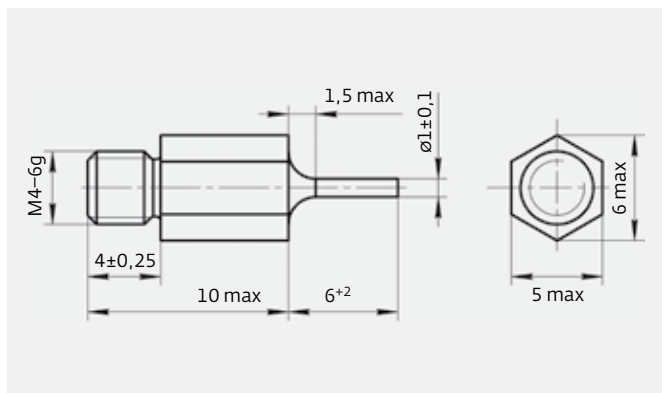


Рис.5. Конструкция и размеры конденсаторов с номинальным напряжением 250 В

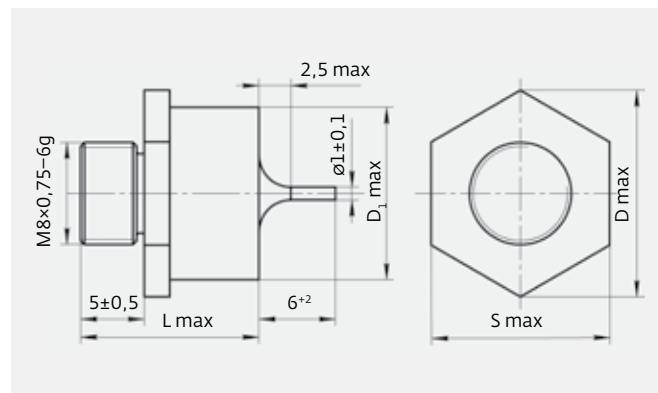


Рис.6. Конструкция и размеры (см. табл.1) конденсаторов с номинальным напряжением 500, 750 и 1000 В

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

C _{ном}	f _{рез} , МГц	A _{рез} , дБ	Вносимое затухание А, 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	20	10	8	
0,022 мкФ	15	50	0,5	10	30	35				
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				
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				
0,33 мкФ	4,4		22	32	58					

Таблица 4. Допустимые реактивные параметры конденсаторов К10-85

$U_{\text{ном}}, \text{В}$	Типоразмер	$P_{\text{доп}}, \text{Вар (H20, H50)}$	$I_{\text{доп}}, \text{А (MΠ0)}$	f_0
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).

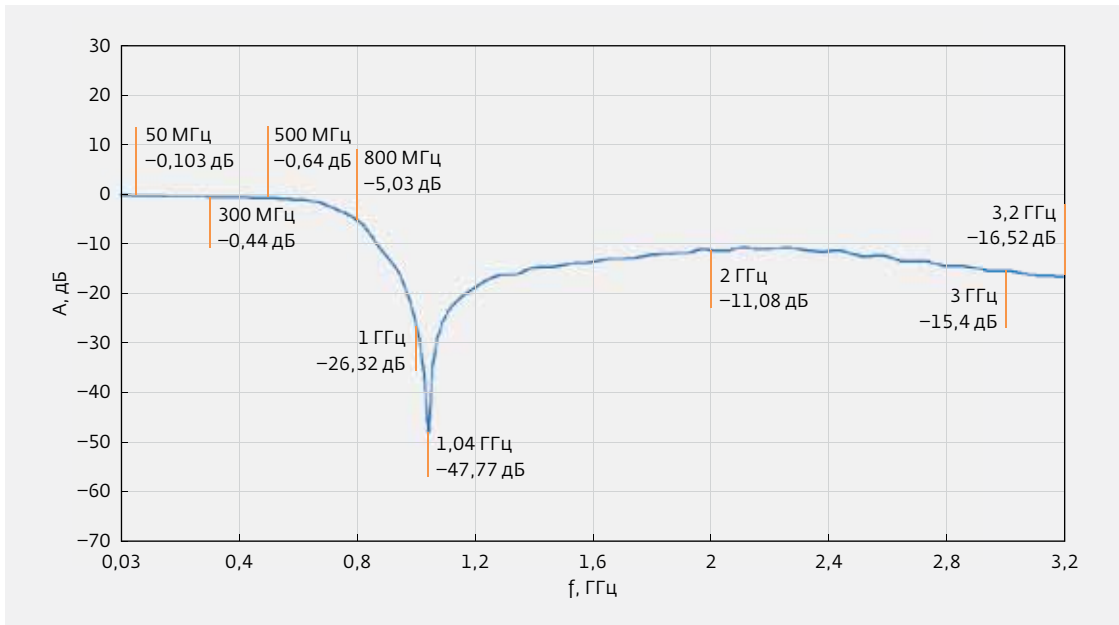


Рис.7. АЧХ конденсаторов К10-85, МПО, 4,7 пФ, 250 В

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.

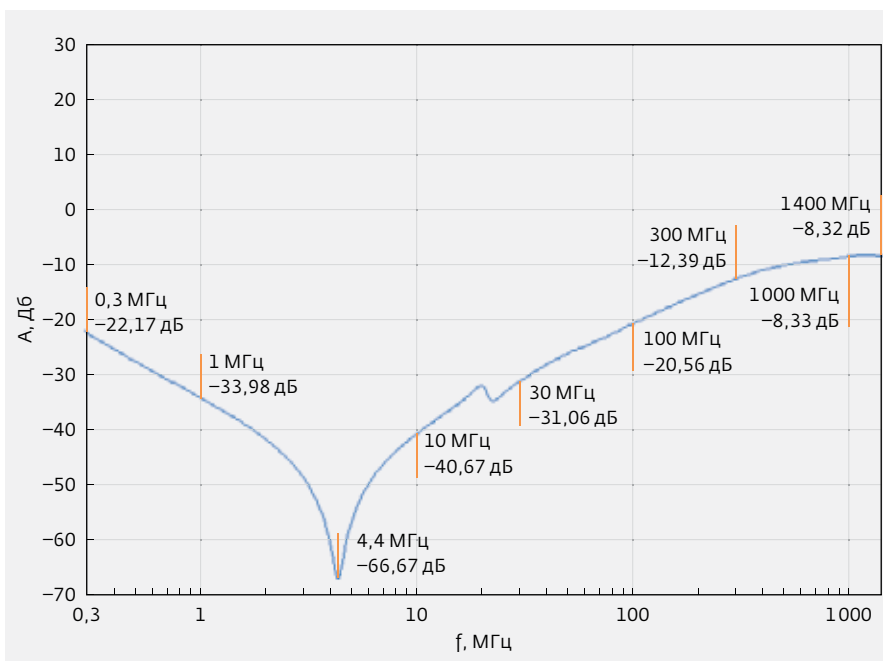


Рис.8. АЧХ конденсаторов К10-85, Н50, 0,33 мкФ, 250 В

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 ($tg\delta=0,0001$ –

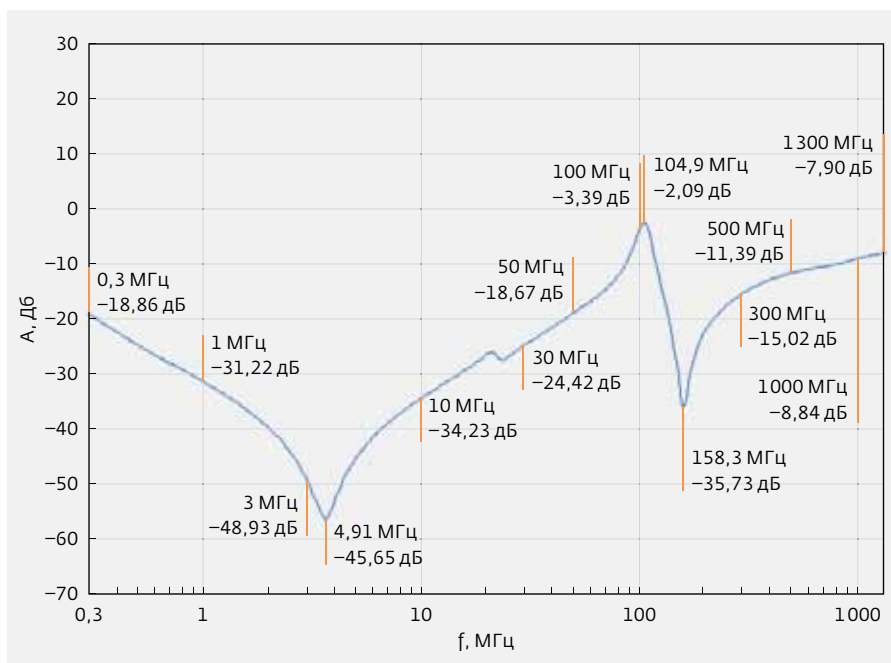


Рис.9. АЧХ параллельно соединенных конденсаторов 150 пФ и 0,33 мкФ

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.