

# КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ ФИЛЬТРОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Евгений Карпов, Александр Найдено*

В статье приведены результаты исследования разных типов емкостей, пригодных для применения в разделительных фильтрах акустических систем.

Измерены уровни искажений, вносимые ими в звуковой тракт, и приведены рекомендации по выбору типов конденсаторов.

## Вместо предисловия

Проведение этих измерений совершенно не планировалось, и только случайное стечение обстоятельств инициировало эту работу:

Во-первых, нам в руки попала плата разделительных фильтров, выуженная из какой-то импортной акустической системы.

При ближайшем рассмотрении на плате обнаружилась фирменная эмблема довольно известного производителя, что заставило нас посмотреть на эту плату уже другими глазами. Несколько удивило то, что одна из катушек оказалась намотанной на незамкнутом ферромагнитном сердечнике. Сразу захотелось узнать, что же это за чудо-материал (по внешнему виду он похож на обыкновенный альсифер), кроме того, в фильтрах использовались неполярные электролитические конденсаторы. Это тоже вызвало повышенный интерес.

Во-вторых, в лаборатории временно находился усилитель Sony TA-N80ES, обладающий очень высокой линейностью и чудовищным запасом мощности. Это благоприятное сочетание параметров позволяло воспользоваться им как измерительным устройством, и испытать элементы фильтров в режимах работы, близких к реальным. Грех было не воспользоваться этой ситуацией, и мы соорудили испытательный стенд.

Подключение к стенду индуктивности с сердечником ничего, кроме разочарования, не вызвало. Чудо не состоялось, и появившаяся в спектре здоровенная третья гармоника подтвердила известную аксиому – все катушки должны быть воздушными. Подключение емкостей тоже не особенно обрадовало, поскольку вносимые ими искажения также были довольно значительными. Собственно говоря, по причине столь явного несоответствия между имиджем фирмы и полученным результатом измерений, производитель не называется. Возможно, это подделка, а если нет, то надеюсь, что они исправились – плата была довольно старой.

Для сравнения подключили несколько емкостей другого типа; различия в уровне вносимых искажения были столь значительными, что было решено обследовать все доступные для нас на данный момент типы емкостей, теоретически пригодных для использования в разделительных фильтрах, и опубликовать полученные результаты.

## Методика испытаний

Наиболее часто в акустических системах используются разделительные фильтры первого и второго порядка (для двухполосной системы они показаны на рисунке 1 а и б, соответственно).

Эквивалентные схемы включения конденсатора для приведенных схем совершенно очевидны и показаны на рисунке 2. Так как нас интересовало не измерение уровня вносимых искажений для конкретного фильтра, а уровень искажений, вносимый различными типами емкостей, для проведения испытаний была выбрана схема 2а (схемы 2б и 2в нам понадобятся в дальнейшем). Она наиболее проста, и ток емкости непосредственно равен току нагрузки. Для проведения измерений реактивное сопротивление головки было заменено на эквивалентное активное сопротивление. Это вполне допустимое упрощение, так как выше резонансной частоты головки (в рабочем диапазоне частот) можно принять сопротивление головки приблизительно равным его номинальному значению, а частоты среза фильтров, как правило, лежат существенно выше резонансных частот головок.

Схема, в которую включались емкости для тестирования, показана на рисунке 3. Эквивалентное сопротивление нагрузки  $R_L$  было принято равным  $8\Omega$ , измерительные приборы подключались непосредственно параллельно нагрузке. На нагрузке устанавливалось напряжение близким

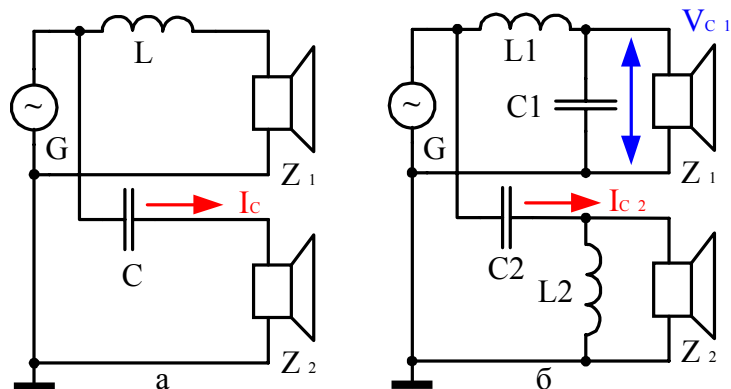


Рисунок 1

к  $7V_{RMS}$ , что приблизительно соответствует 6 Ваттам мощности, подводимой к динамической головке.

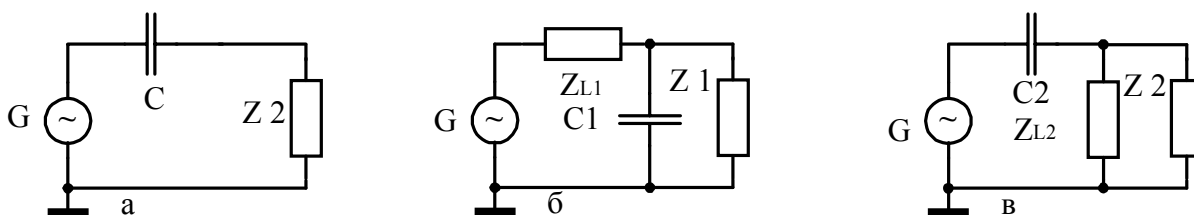


Рисунок 2

Измерения проводились на двух частотах: для емкостей относительно больших номиналов (более  $10\mu F$ ) - на частоте 500Hz, а для емкостей меньших номиналов - на частоте 5kHz. Выбор частот для измерений был сделан, исходя из реально встречающихся частот раздела в двух- и трех полосных громкоговорителях.

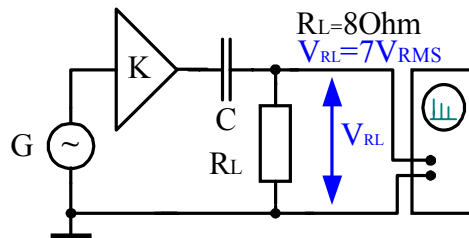


Рисунок 3

## Результаты измерений

Ниже в таблице приведены численные результаты измерений уровней гармонических составляющих для конденсаторов разных типов, а на рисунках - характерные для них спектры сигнала на нагрузке. Для сравнения, на рисунках 4 и 5 приведен спектр выходного сигнала усилителя на частотах 500Hz и 5kHz соответственно.

| Тип емкости           | Частота измерения (kHz) | Уровни гармоник (mV) |      |      |      |      | Коэффициент гармоник (%) <sup>6</sup> | Примечание <sup>1</sup>    | Рис. |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|------|------|------|------|---------------------------------------|----------------------------|------|
|                       |                         | 2                    | 3    | 5    | 7    | 9    |                                       |                            |      |
| -                     | 0.5                     | .39                  | .21  | .2   | -    | -    | .0069                                 | Тестовый сигнал            | 4    |
| -                     | 5                       | .234                 | .494 | .354 | -    | -    | .0092                                 | Тестовый сигнал            | 5    |
| КБГ-МН                | 0.5                     | .32                  | 2.11 | .92  | .47  | .74  | .0355                                 | 6.0μFx200V x 2             | 6    |
| МБГО                  | 0.5                     | .342                 | 2.76 | .975 | .364 | .436 | .0434                                 | 20μFx500V                  | 7    |
| МБГО-1                | 0.5                     | .316                 | 1.97 | .796 | .298 | .156 | .0314                                 | 20μFx400V                  | 8    |
| МБГО-2                | 0.5                     | .33                  | 1.17 | .97  | .76  | .5   | .0260                                 | 10.0μFx400V                | 9    |
| МБГЧ-1                | 5                       | .276                 | 1.31 | .768 | -    | -    | .0223                                 | 1.0μFx250V                 | 10   |
| К42-У2                | 5                       | .278                 | .384 | .392 | -    | -    | .0089                                 | 1.0μFx250V                 | 11   |
| К42-114               | 5                       | .278                 | .384 | .392 | -    | -    | .0089                                 | 4.7μFx125V                 | 11   |
| К73П-2                | 0.5                     | .38                  | .25  | -    | -    | -    | .0066                                 | 10.0μFx400V                | 12   |
| К73П-2                | 5                       | .278                 | .384 | .392 | -    | -    | .0089                                 | 1.0μFx400V                 | 11   |
| К73П-3                | 0.5                     | .38                  | .25  | -    | -    | -    | .0066                                 | 1.0μFx160V x 10            | 12   |
| К73-17                | 0.5                     | .38                  | .33  | -    | -    | -    | .0073                                 | 3.3μFx63V x 3              | 13   |
| KTSM66 <sup>2</sup>   | 0.5                     | .35                  | .171 | -    | -    | -    | .0056                                 | 10μFx660VAC                | 14   |
| KNM 3117 <sup>3</sup> | 0.5                     | .3                   | .224 | -    | -    | -    | .0054                                 | 10μFx450VAC                | 15   |
| Не известен           | 0.5                     | .292                 | 3.76 | .26  | -    | -    | .0546                                 | 20μFx63V <sup>4</sup>      | 16   |
| К50-16                | 0.5                     | .38                  | 2.45 | -    | -    | -    | .0358                                 | 50μFx100V x 2 <sup>5</sup> | 17   |

<sup>1</sup> В графе таблицы – «Примечание», указаны конкретные номиналы емкостей, которые тестировались. Если емкость составлялась из нескольких емкостей меньшего номинала, то после рабочего напряжения указывается число параллельно включенных емкостей.

- 2 Универсальная емкость с полипропиленовым диэлектриком производства Cornell Dubilier.
- 3 Емкость с полипропиленовым диэлектриком производства Iskra, основное назначение емкости - работа в фазосдвигающих цепях электродвигателей.
- 4 Электролитическая неполярная емкость использовалась в разделительном фильтре акустической системы. Производителя емкости, к сожалению, определить не удалось.
- 5 Полярные электролитические емкости были включены последовательно.
- 6 Коэффициент гармоник рассчитан не относительно тестового сигнала, а относительно уровня первой гармоники, измеренной в этом испытании. Это вызвано сложностью точной установки уровня первой гармоники в каждом испытании.

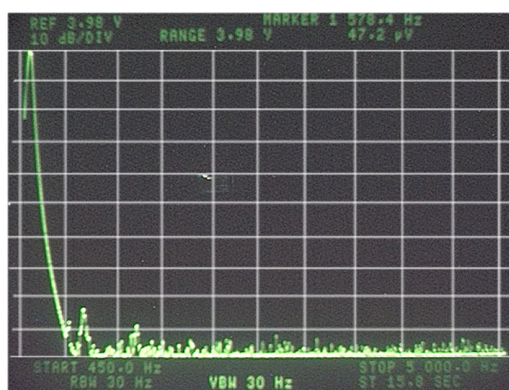


Рисунок 4  
Тестовый сигнал – 500Hz

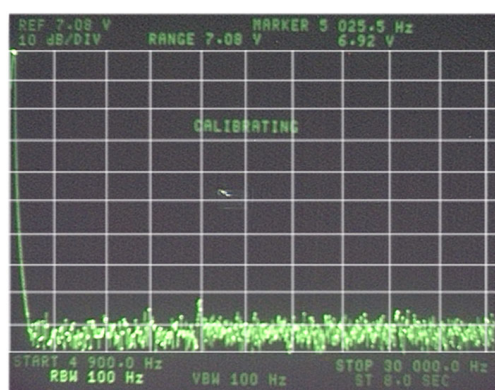


Рисунок 5  
Тестовый сигнал – 5kHz

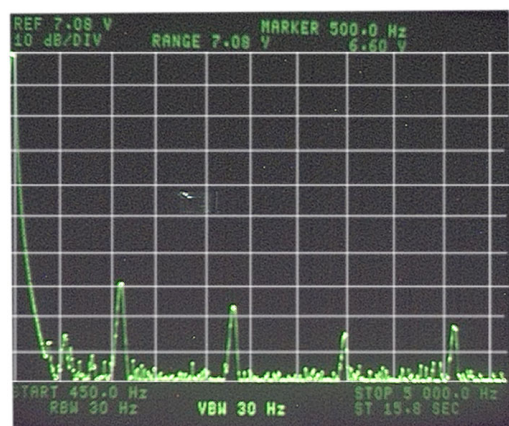


Рисунок 6  
КБГ-МН (500Hz)

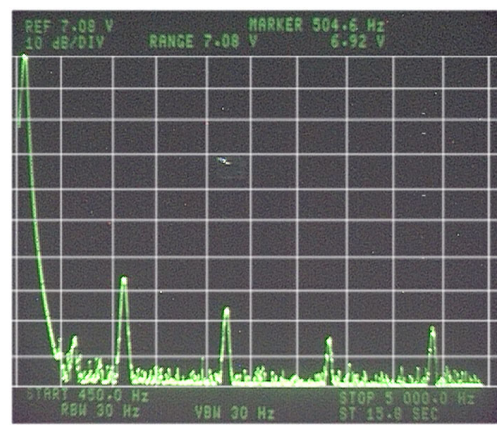


Рисунок 7  
МБГО (500Hz)

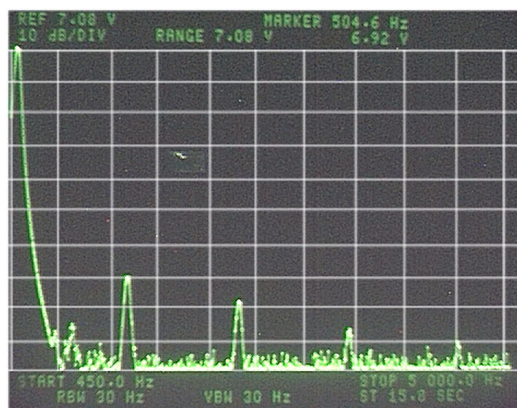


Рисунок 8  
МБГО-1 (500Hz)

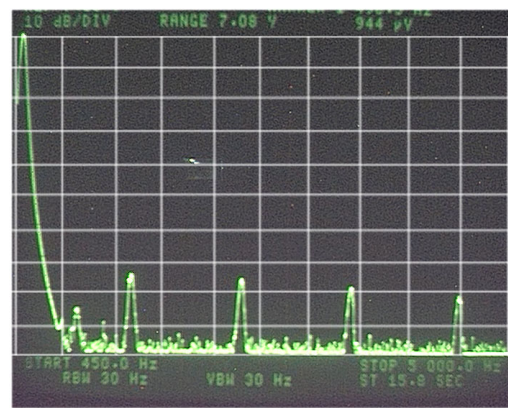


Рисунок 9  
МБГО-2 (500Hz)



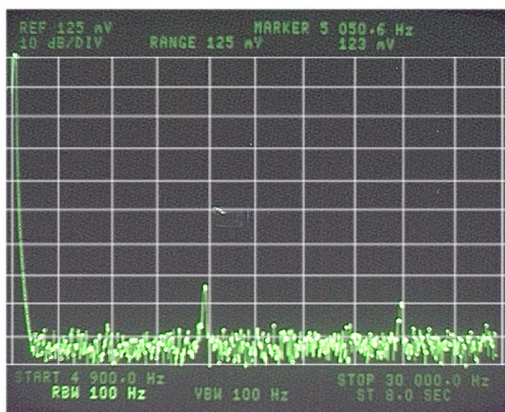


Рисунок 10  
МБГЧ-1 (500Hz)

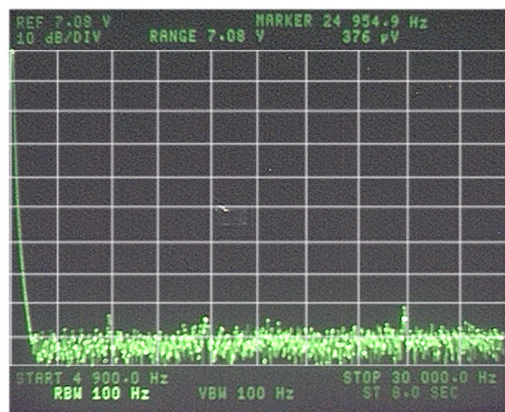


Рисунок 11  
К42-У2, К42-114, К73-П2 (5kHz)

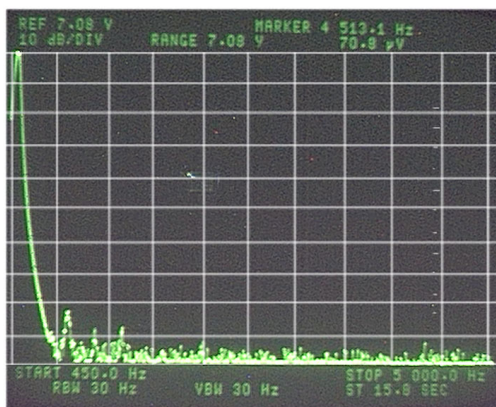


Рисунок 12  
К73-П2, К73-П3 (500Hz)

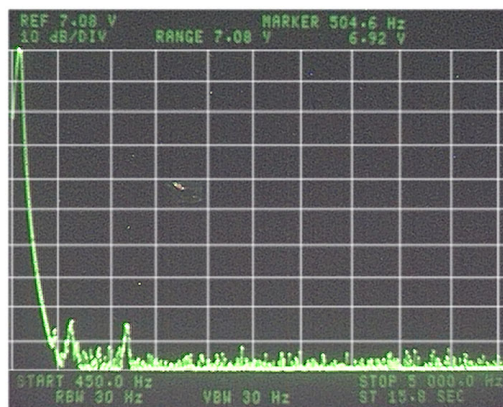


Рисунок 13  
К73-17 (500Hz)

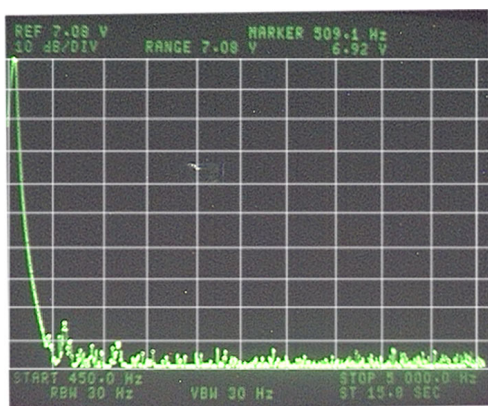


Рисунок 14  
КТSM66 (500Hz)

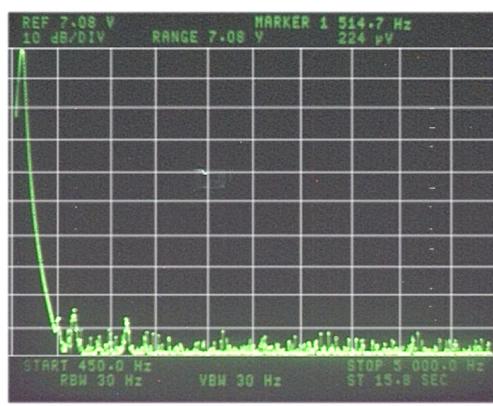


Рисунок 15  
КNM 3117 (500Hz)

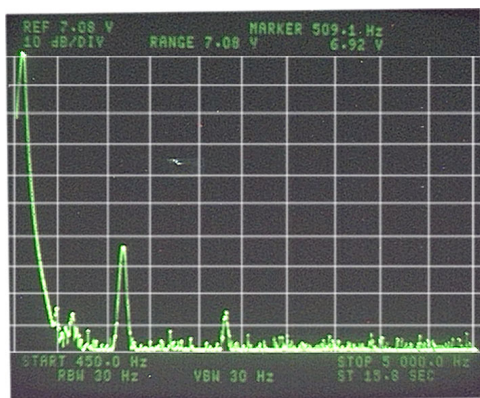


Рисунок 16  
Тип не известен

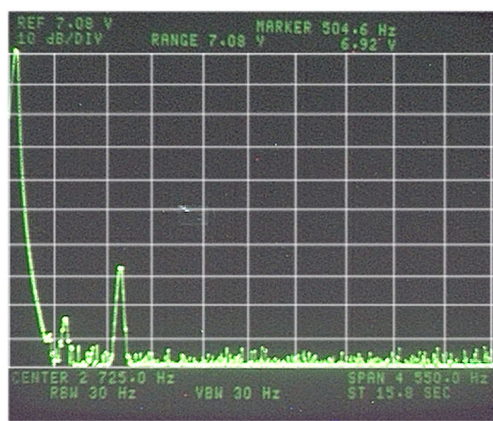


Рисунок 17  
К50-16 (500Hz)

## Анализ результатов и рекомендации по выбору типа конденсатора

Как видно из таблицы, конденсаторы, в которых используется в качестве диэлектрика бумага, в основном, имеют худшие показатели. Это относится как к электролитическим конденсаторам, так и к неэлектролитическим конденсаторам с неполярной пропиткой. Результат вполне объяснимый: бумага, являющаяся органическим диэлектриком, обладает значительной абсорбцией электрических зарядов и значительными потерями в области повышенных частот [1].

Металлобумажные (МБГО) и бумажные (КБГ-МН) конденсаторы, удовлетворительно работающие при больших поляризующих напряжениях, обнаружили неприятную особенность при его отсутствии – обогащение спектра сигнала высшими нечетными гармониками, вплоть до девятой. Из бумажных конденсаторов удовлетворительные результаты (сравнимые с пленочными емкостями) показали конденсаторы типа К42-У2 и К42-114 с металлизированными обкладками.

По сравнению с бумажными емкостями пленочные емкости вносят значительно меньшие искажения в сигнал, и отличия между емкостями с разным диэлектриком существенно меньше. Также пленочные емкости имеют значительно меньшие потери (на порядок) [2].

В пленочных конденсаторах нелинейность характеристик, в основном, определяется типом используемого диэлектрика. По результатам испытаний видно, что наименьшие искажения обеспечивали конденсаторы с полипропиленовым диэлектриком (KTSM66, KNM 3117), чуть хуже – полиэтилентерефталатные (K73П, K73-17).

Следует отметить, что все испытанные конденсаторы практически не вносят четных гармоник в сигнал, что свидетельствует о высокой симметричности характеристик.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что при подборе конденсаторов для фильтров следует избегать использования бумажных конденсаторов общего применения старых типов (в крайнем случае, можно использовать конденсаторы типа МБГЧ). Также следует с определенной осторожностью использовать конденсаторы с комбинированным диэлектриком (например, К75), хотя диэлектрик и слабо полярный. Также нежелательно использование лакопленочных емкостей (К76), так как они по свойствам приближаются к электролитическим.

Предпочтение следует отдавать пленочным конденсаторам, в первую очередь, с поликарбонатным (типа К77) или полипропиленовым диэлектриком (часто подходящие импортные пленочные емкости относят к общему классу Dry Film – сухая пленка). Типов конденсаторов существует великое множество и, конечно, емкости с одним типом диэлектрика могут иметь существенно разные параметры. Но существует достаточно общее правило, которое можно использовать при подборе типа емкости – чем для более жесткого импульсного режима предназначен конденсатор (например, конденсатор предназначен для работы в демпфирующих цепях тиристорных инверторов), тем лучше у него параметры, ему и следует отдать предпочтение.

Существует еще один момент при выборе типа емкости, который практически не затрагивается в литературе – это обеспечение допустимого электрического режима конденсатора. Актуальность этого вопроса растет вместе с ростом выходной мощности усилителей.

С одной стороны, для большинства типов емкостей общего применения с повышением частоты значительно снижается область безопасных режимов работы, а выход за допустимые пределы снижает надежность работы и срок службы емкости.

С другой стороны, чрезмерная нагрузка емкости по переменному току приводит к её перегреву и дрейфу параметров, (тепловые постоянные времени емкостей лежат в пределах единиц – десятков минут) что может непосредственно отразиться на качестве звуковоспроизведения.

Например, для емкости типа К73П-2 10.0μF×400V на частоте 1kHz допустимое значение синусоидального действующего тока приблизительно составляет 2А, что позволит получить на 8-омной нагрузке 32 ватта, а на 4-омной – 16. Если ток носит импульсный характер, то допустимые значения будут еще меньше.

Поэтому целесообразно оценить токи, текущие через емкости, и сравнить их с допустимыми значениями. Все оценки мы будем проводить упрощенно и в предположении, что напряжения и токи синусоидальны, точные расчеты очень громоздки и практически невыполнимы вручную.

Для фильтра нижних частот (рис. 16 и 26) максимальный ток  $I_{C1}$  через емкость С1 будет протекать на резонансной частоте контура и может быть вычислен по выражению:

$$I_{C1} = \frac{E \cdot C1 \cdot R_{L1}}{L1} \quad (1),$$

где  $E$  – действующее напряжение на выходе усилителя,  $R_{L1}$  – номинальное сопротивление низко-частотной динамической головки.

Для фильтра верхних частот, как для первого (рис. 1а и 2а), так второго (рис. 1б и 2в) порядка, максимальный ток емкости  $C$  ( $C2$ ) определяется по выражению:

$$I_C(I_{C2}) \approx \frac{E}{R_{L2}} \quad (2),$$

где  $R_{L2}$  – номинальное сопротивление высокочастотной динамической головки.

К сожалению, для большинства типов конденсаторов эти данные отсутствуют, но как правило, приведены графики допустимой амплитуды переменной составляющей от частоты. Из них можно оценить допустимый ток конденсатора, воспользовавшись следующей методикой [1]. Последовательность вычисления тока следующая:

По графику определяют величину допустимой амплитуды переменной составляющей на интересующей частоте и определяют допустимое действующее значение напряжения на конденсаторе по формуле –

$$U_{f_{\max}} = \frac{U_A}{\sqrt{2}} \quad (3),$$

где  $U_A$  – амплитуда переменной составляющей на заданной частоте  $f$ .

Допустимый ток емкости  $I_{\max}$  на определенной частоте вычисляется по формуле –

$$I_{\max} = U_{f_{\max}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (4),$$

где  $f$  – частота, для которой определялась величина  $U_A$ ,  $C$  – емкость конденсатора.

Для фильтра нижних частот ток емкости имеет явно выраженный максимум на частоте резонанса контура, для этой частоты и определяется допустимый ток. Для конденсатора - фильтра верхних частот придется выполнить расчет несколько раз для рабочего диапазона частот, в виду разнообразия зависимостей допустимой амплитуды переменной составляющей от частоты для разных типов конденсаторов. Также дело в том, что максимум тока емкости заметно смещен от частоты резонанса в область более высоких частот, а выражение, точно определяющее эту частоту, сильно громоздкое. Учитывая, что максимальное значение тока емкости не превышает 10÷15% от величины полученной в формуле (2) для фильтра Баттерворта (50÷60% для фильтра Чебышева), достаточно рассчитать три - четыре значения допустимого тока емкости в диапазоне от резонансной частоты фильтра до верхней рабочей частоты и использовать минимальное. В любом случае, желательно иметь 20÷30% запаса по допустимым токам.

В заключение, следует заметить, что, рассчитав параметры фильтра и получив необходимые номиналы конденсаторов (а они получаются, как правило, довольно большими), нет необходимости сильно напрягаться и искать экзотические емкости. Гораздо целесообразней использовать параллельное включение емкостей относительно малых номиналов. Такой подход позволяет не только использовать менее дефицитные и более высококачественные емкости и существенно снизить паразитные параметры эквивалентного конденсатора, но и значительно расширить номенклатуру пригодных типов конденсаторов. Общее увеличение габаритов фильтра, как правило, решающего значения не имеет.

## Литература

1. О. Л. Мезенин и др., Справочник по расчету режимов работы электрических конденсаторов, К.: Техніка, 1987.
2. М. Н. Дьяконов и др., Справочник по электрическим конденсаторам, М.: Радио и связь, 1983.