

## ЗАЩИТА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИНАМИКА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

С. Зотов

Как правило, если акустическая система спроектирована правильно, и грамотно эксплуатируется, то не возникает никаких проблем с надежностью. Однако, довольно часто некоторые «любители» музыки включают свою акустику, что называется, на «всю катушку». При этом страдают не только ближайшие соседи, но и весь дом. Очень часто в такой ситуации динамики не выдерживают и сгорают, причём высокочастотные динамики горят чаще всего. Почему ВЧ-динамики горят чаще всего? Ну, во-первых, не всегда горят именно высокочастотники, иногда горят басовики и среднечастотники. Но все же, (во-вторых) – пищалки горят довольно-таки часто!

При подведении к динамику номинальной мощности звуковая катушка нагревается до температуры примерно 90-100°C (иногда и более), совершенно ясно, что это высокая температура (эти справочные данные взяты из книги И. Алдошиной «Электродинамические громкоговорители»). При этом звуковые катушки у низкочастотных, среднечастотных и высокочастотных динамиков нагреваются с разной скоростью, это обусловлено так называемой «тепловой постоянной времени» динамика. У низкочастотного динамика с номинальной мощностью более 30 Вт тепловая постоянная составляет 15-20 секунд, т.е. при подведении номинальной мощности к динамику звуковая катушка нагреется до расчётной температуры за 15-20 секунд. У среднечастотного динамика с номинальной мощностью 15-25 Вт тепловая постоянная времени составляет примерно 5-6 секунд. И, наконец, у высокочастотного динамика тепловая постоянная равна примерно полторы секунды! Это означает, что в случае перегрузки высокочастотного динамика звуковая катушка сгорит почти за одну секунду. Поэтому пищалки и «вылетают» достаточно часто.

Очевидно, что тепловая постоянная времени зависит от частоты сигнала, но также зависит и от диаметра провода, которым намотана звуковая катушка. Так, у низкочастотных динамиков звуковая катушка обычно намотана проводом Ø(0,25-0,35) мм, у среднечастотных – Ø(0,14-0,16) мм, у высокочастотных динамиков диаметр провода Ø0,10 мм или чуть меньше. Чем тоньше провод – тем меньше тепловая постоянная и, соответственно, меньше времени потребуется для выхода динамика из строя при перегрузке. Сравним три высокочастотных динамика одинаковой мощности с разными сопротивлениями: 6ГДВ-4-8 (полное сопротивление 8 Ω), 6ГДВ-6-16 (16 Ω) и 6ГДВ-6-25 (25 Ω). У динамика с сопротивлением 8 Ω звуковая катушка намотана проводом Ø0,10 мм, у динамика с сопротивлением 16 Ω звуковая катушка намотана проводом Ø0,08 мм, а у динамика с сопротивлением 25 Ω применён ещё более тонкий провод. В контексте сказанного выше очевидно, что при одинаковых перегрузках первым «сгорит» динамик с сопротивлением 25 Ω, как самый ненадёжный из трёх упомянутых здесь динамиков. А самый надёжный из этой тройки – это динамик с сопротивлением 8 Ω (т.е. 6ГДВ-4-8).

Динамики горят не только от перегрузки во время прослушивания громкой музыки. Иногда это происходит из-за несовершенства усилителей мощности. При включении питания в оконечном усилителе мощности происходят так называемые «переходные процессы», из-за которых напряжение на выходе усилителя может колебаться в течение (1-2)-х секунд. Причём амплитуда такого колебания может приближаться к напряжению питания оконечного усилителя, а это составляет ±(20-40) В. В этом случае в колонках слышен громкий щелчок при включении питания. Аналогичные переходные процессы возникают и при выключении питания. Так вот, очень часто достаточно одного такого «щелчка», чтобы сжечь высокочастотный динамик. Многие усилители мощности старого образца имеют такой недостаток, особенно этим грешит усилитель 70-х годов «Радиотехника УКУ-020» рижского радиозавода. В современных усилителях эти недостатки устранены тем, что колонки подключаются к выходу усилителя мощности через контакты реле, которое включается с задержкой 3-4 секунды после подачи напряжения питания, и выключаются сразу после отключения. В результате переходные процессы в усилителе мощности не передаются на колонки.

В эстрадной акустике высокочастотные динамики, как правило, подключаются непосредственно к отдельному каналу усилителя, т.е. без традиционных разделительных фильтров. Контролировать мощность, подаваемую на высокочастотный канал в такой ситуации

часто не удаётся, поэтому надёжность (и защита от перегрузки) высокочастотных динамиков в эстрадной акустике является значительно более актуальной проблемой.

В общих чертах проблема обозначена. Расскажем здесь об одном интересном способе защиты высокочастотных динамиков от перегрузки.

В некоторых модификациях акустических систем типа S-30 использован индикатор перегрузки, при возникновении перегрузки на лицевой панели акустической системы загорается светодиод. Однако данная система является лишь индикатором, она только информирует о перегрузке, но не защищает динамики от нее.

В акустических системах высшего класса сложности «Кливер 150АС-009» и «Корвет 150АС-001» применена следующая система защиты динамиков. В случае возникновения перегрузки к динамику с помощью реле последовательно подключается дополнительное сопротивление, в итоге – мощность на динамике снижается. Подобная система применена отдельно к высокочастотному и среднечастотному динамику в упомянутых АС. Низкочастотный динамик в этих системах подключен через плавкий предохранитель. Заинтересовавшийся читатель может найти эти схемы в справочниках или в паспортах на эти акустические системы.

Некоторые радиолюбители часто применяют для защиты высокочастотных динамиков лампы накаливания, которые необходимо подсоединять последовательно с динамиком (речь идет о миниатюрных низковольтных лампах накаливания), на рис. 1 показана такая схема.

Эта системы защиты работает следующим образом. При малых мощностях через нагрузку протекает небольшой ток, из-за этого нить накаливания лампы не разогревается, и поэтому сопротивление лампы достаточно низкое. В такой ситуации лампа почти не оказывает влияния на работу ВЧ-динамика. Если же мощность возрастает, и ток через нагрузку увеличивается, то это приводит к тому, что нить накаливания лампы раскаляется, лампа начинает светиться, а сопротивление лампы при этом резко возрастает. Из схемы видно, что лампа с динамиком представляет собой делитель, как оказывается, с переменным коэффициентом деления. Чем больше ток через нагрузку, тем больше сопротивление лампы, и тем больше падение напряжения на лампе  $U_L$ , соответственно падение напряжения на динамике  $U_D$  – уменьшается относительно к общему напряжению  $U_0$ , т.е. происходит автоматическое ограничение мощности на динамике, это и означает, что система защиты срабатывает. Это почти что «компрессор-лимитер»!

Принцип работы такой системы защиты достаточно простой, однако – как рассчитать параметры лампы? Иными словами, как правильно выбрать вольтаж лампы накаливания и её мощность? Вот, что называется, вопрос «по существу», именно этим мы и займемся далее.

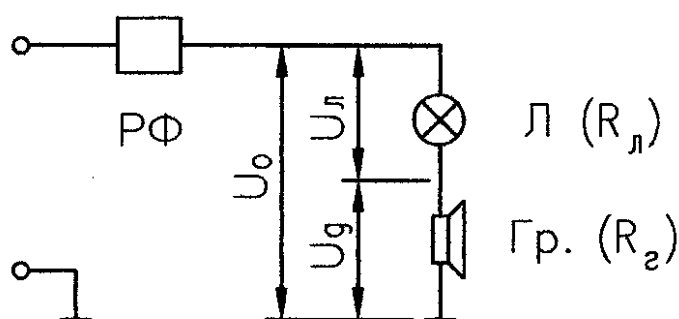


Рис. 1. Схема подсоединения лампы накаливания для защиты ВЧ-динамика от перегрузки. РФ – разделительный фильтр высокочастотного звена, Л – лампа накаливания ( $R_L$  – сопротивление лампы), Гр. – ВЧ-динамик ( $R_2$  – полное сопротивление динамика),  $U_L$  (в) – напряжение на лампе,  $U_D$  (в) – напряжение на динамике,  $U_0$  (в) – общее напряжение на нагрузке. Пояснения в тексте.

Здесь будут изложены «Упрощённый расчёт» параметров лампы накаливания, обеспечивающей защиту от 4х-кратной перегрузки ВЧ-динамика и так называемый «Поверочный расчёт». Поверочный расчёт будет интересен любителям математики. Он представляет собой полный и общий расчёт, который позволяет рассчитать, при произвольно заданной лампе, своего рода «перегрузочную характеристику» системы защиты, т.е. допустимую величину перегрузки и степень ослабления сигнала при различных уровнях мощности.

## УПРОЩЁННЫЙ РАСЧЁТ

Демонстрацию расчета проведем на конкретном динамике. Выберем для примера высокочастотный динамик 6ГДВ-6-25, этот 25ти-Омный динамик рижского радиозавода используется в некоторых модификациях системы S-90 и S-100 с общим сопротивлением колонок 8  $\Omega$ .

Будем считать, что номинальная мощность его равна 6 Вт, а полное сопротивление 25  $\Omega$ . Представим на мгновение, что динамик подключен к усилителю напрямую, и зададим вопрос: «При каком напряжении этот динамик будет потреблять мощность, равную номинальной, т.е. 6 Вт»? Рассчитать это напряжение очень просто:

$$U_{\text{ном}} = \sqrt{N_{\text{н}} R_{\text{г}}} = \sqrt{6 \times 25} = 12,2 \approx 12(\text{В}) \quad (1)$$

где:  $N_{\text{н}}$  (Вт) – номинальная мощность динамика,  $R_{\text{г}}$  ( $\Omega$ ) – полное сопротивление динамика.

Совершенно ясно, что если на этот динамик подать напряжение 12 вольт, то потребляемая им мощность составит 6 Вт. Очевидно также, что если на динамик подать напряжение вдвое больше, т.е. 24 вольта, то мощность на динамике возрастет в 4 раза! Это обусловлено тем, что мощность на динамике (или любой другой нагрузке) пропорциональна квадрату напряжения:

$$N = \frac{U_{\text{д}}^2}{R_{\text{г}}} \quad (2)$$

где:  $N$  (Вт) – мощность на динамике,  $U_{\text{д}}$  (В) – напряжение на динамике,  $R_{\text{г}}$  ( $\Omega$ ) – полное сопротивление динамика.

А теперь вообразите, что последовательно с динамиком 6ГДВ-6-25 подключена лампа накаливания 12В х 6Вт. Такая лампы выбрана не случайно, т.к. динамик 25ГДВ-6-25 при напряжении 12 вольт развивает мощность 6 Вт. Короче, если теперь на динамик с лампой (см. рис. 1) подать напряжение 24 вольта, то это напряжение поделится поровну между лампой и динамиком, т.е. по 12 вольт на лампу и на динамик.

Таким образом, в данном конкретном случае применение лампы с рабочим напряжением 12 В и мощностью 6 Вт обеспечивает защиту динамика 6ГДВ-6-25 от 4х-кратной перегрузки.

Озвучим общую формулировку. Для обеспечения защиты от 4х-кратной перегрузки мощность лампы накаливания должна равняться номинальной мощности ВЧ-динамика, а рабочее напряжение лампы должно быть равно напряжению, при котором динамик потребляет номинальную мощность. Итак, весь расчёт сводится всего к одной формуле, а именно к формуле (1).

Очевидно, что применение лампы накаливания в качестве защиты приведет к некоторому ослаблению звукового давления высокочастотного динамика. Упрощенный расчет, показанный здесь, не дает возможности определить степень ослабления звукового давления при разных мощностях. Для радиолюбителей, желающих знать полную характеристику такой системы защиты, рекомендуем ознакомиться с «Поверочным расчетом».

## ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЁТ

Лампа накаливания является в данном случае переменным сопротивлением и обеспечивает защиту высокочастотного динамика. Для того, чтобы математически рассчитать своего рода «перегрузочную характеристику» такой системы защиты необходимо знать характеристику лампы, а именно нужно знать <Зависимость сопротивления лампы от напряжения на лампе>.

Несколько слов нужно сказать об обозначениях миниатюрных ламп накаливания. Характеристика лампы обозначается всегда двумя параметрами. Существует два способа обозначения ламп накаливания: либо это напряжение и мощность, либо – напряжение и ток. Приведем примеры. Так, лампа «12В х 4Вт» имеет рабочее напряжение 12 вольт и мощность 4 ватта. Другой пример, лампа «6,5В х 0,3А» рассчитана на рабочее напряжение 6,5 вольт и рабочий ток 0,3 ампера. Очевидно, что, зная рабочий ток и напряжение лампы, всегда можно рассчитать мощность лампы (покажем это на примере лампы «6,5В х 0,3А»):

$$N_{\text{л}} = U_{\text{рл}} I_{\text{рл}} = 6,5 \times 0,3 = 1,95 \approx 2,0(\text{Вт}) \quad (3)$$

где:  $N_{\text{л}}$  (Вт) – мощность лампы накаливания,  $U_{\text{рл}}$  (В) – рабочее напряжение лампы,  $I_{\text{рл}}$  (А) – рабочий ток лампы.

Прежде, чем приступать к расчету системы защиты, как уже было сказано, определим экспериментально так называемую <характеристику лампы> накаливания (т.е. зависимость сопротивления лампы от напряжения на лампе). Делается это следующим образом. Лампу накаливания следует подключить к источнику питания, затем нужно изменять напряжение на лампе и одновременно измерять ток, протекающий через лампу (схему приводить здесь не имеет смысла из-за простоты). Напряжение может изменяться от нуля до максимального значения, которое равно рабочему напряжению лампы. Таким образом, получается зависимость <тока лампы от напряжения на лампе>. Теперь осталось рассчитать сопротивление лампы, используя закон Ома:

$$R_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л}}}{I_{\text{л}}} \quad (4)$$

где:  $R_{\text{л}}$  ( $\Omega$ ) – сопротивление лампы накаливания,  $U_{\text{л}}$  (В) – напряжение на лампе,  $I_{\text{л}}$  (А) – ток, протекающий через лампу.

Получим описанным способом характеристики для следующих семи миниатюрных ламп накаливания: 3,5В x 0,26А, 6,5В x 0,3А, 6В x 5Вт, 12В x 1,5Вт, 12В x 4Вт, 12В x 10Вт и 26В x 0,12А.

Таблица № 1

### Характеристики некоторых миниатюрных низковольтных ламп накаливания

3,5В x 0,26А	$U_{\text{л}}$ , (В)	0	1,0	2,0	3,0	3,5		
	$I_{\text{л}}$ , (А)	--	0,14	0,20	0,24	0,26		
	$R_{\text{л}}$ , ( $\Omega$ )	1,8	7,1	10,0	12,5	13,5		
6,5В x 0,3А	$U_{\text{л}}$ , (В)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,5
	$I_{\text{л}}$ , (А)	--	0,11	0,16	0,20	0,23	0,27	0,30
	$R_{\text{л}}$ , ( $\Omega$ )	2,5	9,1	12,5	15,0	17,4	18,5	21,6
6В x 5Вт	$U_{\text{л}}$ , (В)	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
	$I_{\text{л}}$ , (А)	--	0,32	0,43	0,51	0,59	0,66	0,72
	$R_{\text{л}}$ , ( $\Omega$ )	1,1	3,1	4,6	5,9	6,8	7,6	8,3
12В x 1,5Вт	$U_{\text{л}}$ , (В)	0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
	$I_{\text{л}}$ , (А)	--	0,08	0,12	0,15	0,18	0,20	0,21
	$R_{\text{л}}$ , ( $\Omega$ )	6,5	25,0	33,3	40,0	44,4	50,0	57,0
12В x 4Вт	$U_{\text{л}}$ , (В)	0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
	$I_{\text{л}}$ , (А)	--	0,14	0,17	0,21	0,24	0,27	0,29
	$R_{\text{л}}$ , ( $\Omega$ )	4,8	14,3	23,5	28,5	33,3	37,0	41,4
12В x 10Вт	$U_{\text{л}}$ , (В)	0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
	$I_{\text{л}}$ , (А)	--	0,30	0,40	0,49	0,56	0,63	0,69
	$R_{\text{л}}$ , ( $\Omega$ )	1,8	6,7	10,0	12,2	14,3	15,9	17,4
26В x 0,12А	$U_{\text{л}}$ , (В)	0	5,0	10,0	15,0	20,0	26,0	
	$I_{\text{л}}$ , (А)	--	0,05	0,07	0,09	0,11	0,12	
	$R_{\text{л}}$ , ( $\Omega$ )	21,0	100,0	143,0	167,0	182,0	217,0	

*Комментарий.* Характеристики ламп, полученные экспериментально, приведены в таблице № 1. В левом столбце приведены обозначения ламп. Справа – характеристики ламп. Для каждой лампы приведены три строки:  $U_{\text{л}}$ , (В) – напряжение на лампе,  $I_{\text{л}}$ , (А) – ток, протекающий через лампу и  $R_{\text{л}}$ , ( $\Omega$ ) – сопротивление лампы. Первые две строки – это измеренные параметры, а третья строка ( $R_{\text{л}}$ ) – это расчетная величина, полученная по формуле (4). При нулевом напряжении ток, естественно, не измерялся, а просто было измерено сопротивление лампы напрямую (тестером).

Посмотрим характеристику лампы «3,5В x 0,26А». При нулевом напряжении сопротивление лампы равно 1,8  $\Omega$ , при напряжении 1В – сопротивление равно 7,1  $\Omega$ , при напряжении 2В – сопротивление равно 10,0  $\Omega$ , при напряжении 3 В – сопротивление равно 12,5  $\Omega$  и, наконец, при напряжении 3,5 В – сопротивление составило 13,5  $\Omega$ .

Если попытаться занести все семь характеристик на один график – то ничего хорошего из этого не получится – характеристики разных ламп «разбегутся» в разные стороны. Поэтому очевидно, что напрямую использовать их в математическом расчёте не представляется возможным, т.к. эти характеристики имеют очень большой разброс по напряжениям и

сопротивлениям. Однако есть и общие черты, а именно отношение максимального сопротивления лампы к минимальному сопротивлению – есть величина примерно одинаковая для всех ламп!

Характеристики различных ламп в таблице № 1 приведены в абсолютных величинах. Преобразуем эти характеристики следующим образом. Сначала введём безразмерные параметры:

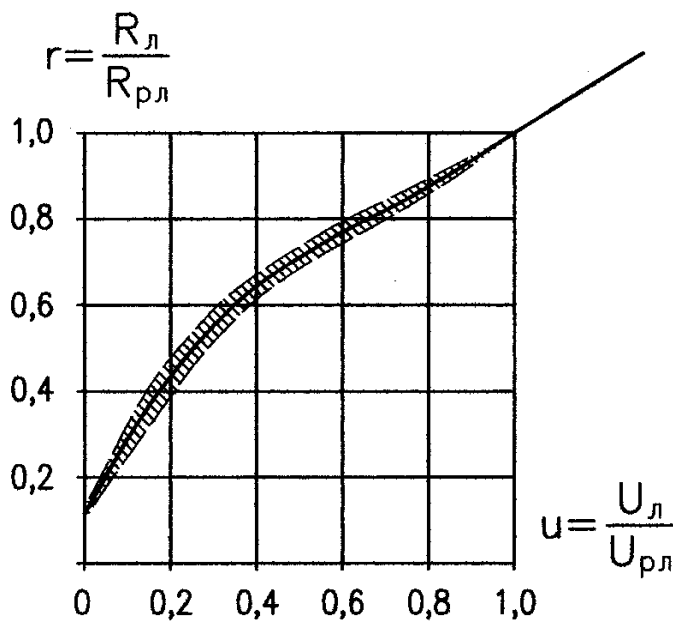
$$u = \frac{U_{\text{л}}}{U_{\text{рл}}} \quad (5)$$

$$r = \frac{R_{\text{л}}}{R_{\text{рл}}} \quad (6)$$

где:  $u$  – относительное напряжение на лампе,  $U_{\text{л}}$  (В) – «текущее» напряжение на лампе,  $U_{\text{рл}}$  (В) – рабочее напряжение лампы (т.е. максимально допустимое),  $r$  – относительное сопротивление лампы,  $R_{\text{л}}$  (Ω) – «текущее» сопротивление лампы,  $R_{\text{рл}}$  (Ω) – максимальное сопротивление лампы (т.е. сопротивление при максимально допустимом напряжении).

Пересчитаем характеристики ламп в таблице № 1 в «безразмерный» вид по формулам (5) и (6). Оказывается, в безразмерном виде характеристики всех приведённых ламп почти совпали. Не будем показывать эти характеристики в новой таблице, а представим их на графике, см. рис. 2. Характеристики для всех семи ламп «уложились» в узкую заштрихованную область между двумя пунктирными линиями на графике. Очевидно, что диапазон всех характеристик (в безразмерных величинах) стал одинаковый – от нуля до единицы. Толстая сплошная линия – это некая средняя характеристика, она «проходит» через середину заштрихованной области. На графике видно, что эта кривая выходит за пределы «единицы». Такая аппроксимация характеристики за пределы  $u > 1,0$  сделана специально, т.к. при расчёте системы защиты возможен вариант, когда напряжение на лампе окажется больше рабочего напряжения лампы. Поэтому средняя характеристика лампы аппроксимирована до значения  $u = 1,3$ . Практика показывает, что миниатюрные лампы накаливания способны выдерживать напряжения, превышающие расчетные на 30%. Совершенно ясно, что при напряжении  $u > 1,0$  относительное сопротивление тоже окажется больше единицы, т.е.  $r > 1,0$ .

Теперь осталось представить полученную кривую осреднённой безразмерной характеристики лампы накаливания (речь идет о толстой сплошной линии на рис. 2) как график некоторой функции, заданной математической формулой, и тогда можно осуществить



проверочный расчёт системы защиты. Не будем приводить здесь подробные математические выкладки, а покажем лишь конечный результат. Для любителей математики отметим, что задача была решена методами так называемого «интерполяционного полинома». Итак, осреднённая безразмерная характеристика лампы накаливания описывается следующей формулой:

Рис. 2. Характеристика ламп накаливания в безразмерных единицах. Заштрихованная область – зона разброса характеристик выбранных ламп,

толстая сплошная линия посередине – осредненная характеристика. Пояснения в тексте.

$$r = 0,1153 + 1,8333u - 0,7135u^2 - 3,1184u^3 + 5,3086u^4 - 2,9509u^5 + 0,5262u^6 \quad (7)$$

где:  $r$  – относительное сопротивление лампы,  $u$  – относительное напряжение на лампе. Следует отметить, что данная формула (с некоторым приближением) справедлива для любой миниатюрной низковольтной лампы накаливания. Нужно также сказать, что максимальное отклонение заштрихованной области от осредненной линии (см. рис. 2) не превышает 15%, поэтому точность приведенной формулы составляет  $\pm 15\%$ . Отметим, что эта формула получена на основе экспериментальных данных, приведенных в таблице № 1.

Теперь, наконец, можно приступить к изложению ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА системы защиты.

**Постановка задачи.** Пусть имеется высокочастотный динамик. Демонстрацию расчёта будем проводить на динамике 6ГДВ-6-25. Предположим, что в качестве защиты выбрана миниатюрная лампа накаливания «12В х 6Вт». Итак, исходные данные:  $N_n=6$  Вт – номинальная мощность ВЧ-динамика,  $R_r=25 \Omega$  – полное сопротивление ВЧ-динамика,  $U_{рл}=12$  В – рабочее напряжение лампы,  $N_l=6$  Вт – мощность лампы.

Требуется рассчитать «перегрузочную характеристику» системы защиты, т.е. <Зависимость мощности на ВЧ-динамике при подсоединённой лампе от мощности на ВЧ-динамике без лампы>. Кроме того, следует определить: общее сопротивление высокочастотного звена  $R_o$  ( $\Omega$ ), спад чувствительности ВЧ-динамика  $S$  (dB) и напряжение на лампе  $U_l$  (В) при различных мощностях. Напряжение на лампе знать необходимо, чтобы быть уверенным, что это напряжение не превышает допустимого (или рабочего) для выбранной лампы.

Расчет заключается в следующем. Необходимо задать мощность на динамике при отключенной лампе, а затем следует рассчитать мощность на динамике при том же напряжении на выходе усилителя мощности и подсоединенной лампе. Соотношение мощностей на динамике «с лампой» и «без лампы» и будет характеризовать эффективность системы защиты.

Сразу оговоримся, что мощности будем рассчитывать в относительных единицах, т.к. это очень удобно для анализа результатов. Введем «коэффициент перегрузки», и обозначим его буквой « $k$ ». Данный коэффициент представляет собой отношение мощности, которую потребляет динамик «при отключенной лампе», к номинальной мощности динамика. Например, если  $k=1$ , то это означает, что усилитель «выдаёт» на выходе напряжение, при котором динамик «без лампы» потребляет мощность, равную номинальной, т.е. 100%; если  $k=3$ , то это означает, что усилитель «выдаёт» на выходе напряжение, при котором на динамик «без лампы» будет подана мощность, превышающую номинальную в 3 раза, или 300% и т.д.

Аналогично введём параметр «относительная мощность» на динамике, обозначим его как « $n_d$ ». Данная величина есть отношение мощности, которую динамик потребляет при включенной лампе, к номинальной мощности динамика. Величина « $n_d$ » является тоже относительной, как и коэффициент « $k$ ». Целью задачи является определение для различных коэффициентов перегрузки « $k$ » относительной мощности « $n_d$ ». По сути, зависимость величины « $n_d$ » от коэффициента « $k$ » и есть искомая «перегрузочная характеристика».

Как было сказано выше, перегрузочная характеристика складывается из множества расчётных точек; для каждого коэффициента « $k$ » имеется своё значение относительной мощности « $n_d$ ». Данный расчёт следует проводить на компьютере или на программируемом калькуляторе. Покажем расчёт (в ручном режиме) только одной «точки» на перегрузочной характеристике.

Для примера зададим коэффициент  $k=2$ . Это означает, что на данном режиме нагрузка (точнее перегрузка) на динамике «без лампы» составит 200%. Теперь рассчитаем относительную мощность на динамике и все «промежуточные» параметры. Далее изложим алгоритм решения задачи.

1. Определим сопротивление лампы при рабочем напряжении лампы:

$$R_{рл} = \frac{U_{рл}^2}{N_l} = \frac{12^2}{6} = 24,0(\Omega) \quad (8)$$

где:  $R_{рл}$  ( $\Omega$ ) – сопротивление лампы при рабочем напряжении лампы,  $U_{рл}=12$  в – рабочее напряжение лампы,  $N_l=6$  Вт – мощность лампы.

2. Определим общее напряжение на нагрузке:

$$U_o = \sqrt{k N_n R_c} = \sqrt{2 \times 6 \times 25} = 17,32 \approx 17,3(в) \quad (9)$$

где:  $U_0$  (В) – общее напряжение на нагрузке,  $k=2$  – заданный коэффициент перегрузки,  $N_n=6$  Вт – номинальная мощность динамика,  $R_r=25 \Omega$  – полное сопротивление динамика.

3. Для дальнейшего расчёта необходимо знать сопротивление лампы (для выбранного режима  $k=2$ ), однако оно неизвестно. Более того, его предстоит рассчитать. В такой ситуации в математике применяют, так называемый, «метод последовательных приближений», т.е. первоначально неизвестная величина задается произвольно, а затем уточняется последующим расчётом. Расчёт ведётся до «схождения» результата. Покажем, как «работает» этот метод на практике. Произвольно зададим сопротивление лампы, равное, например, одному Ому, т.е.:

$$R_{л0} = 1,0(\Omega)$$

Индекс будет показывать «номер» расчёта. В данном случае поставлен индекс «0», т.к. расчёта как такового ещё не было проведено.

4. Определим общее сопротивление нагрузки:

$$R_o = R_{л} + R_z = 1 + 25 = 26,0(\Omega) \quad (10)$$

где:  $R_{л}$  ( $\Omega$ ) – сопротивление лампы, в данном случае вместо  $R_{л}$  подставлено значение  $R_{л0}$ , в последующих расчётах вместо  $R_{л}$  будет подставляться величина, рассчитанная по формуле (13);  $R_r=25 \Omega$  – полное сопротивление динамика.

5. Определим напряжение на динамике:

$$U_o = U_o \frac{R_z}{R_o} = 17,3 \times \frac{25}{26} = 16,63 \approx 16,6(\text{В}) \quad (11)$$

где:  $U_0$  (В) – общее напряжение на нагрузке,  $R_r=25 \Omega$  – полное сопротивление динамика,  $R_o=26 \Omega$  – общее сопротивление нагрузки, которое следует из формулы (10).

6. Определим напряжение на лампе:

$$U_{л} = U_o - U_o = 17,3 - 16,6 = 0,7(\text{В}) \quad (12)$$

где:  $U_0$  (В) – общее напряжение на нагрузке,  $U_{л}$  (В) – напряжение на динамике.

7. Теперь, используя формулу (5), рассчитаем относительное напряжение на лампе:

$$u = \frac{U_{л}}{U_{пл}} = \frac{0,7}{12} = 0,0583$$

где:  $U_{л}$  (В) – «текущее» напряжение на лампе,  $U_{пл}$  (В) – рабочее напряжение лампы.

8. Используя формулы (6) и (7), определим сопротивление лампы:

$$R_{л1} = R_{пл}(0,1153 + 1,8333u - 0,7135u^2 - 3,1184u^3 + 5,3086u^4 - 2,9509u^5 + 0,5262u^6) = 24,0 \times (0,1153 + 1,8333 \times 0,0583 - 0,7135 \times 0,0583^2 - 3,1184 \times 0,0583^3 + 5,3086 \times 0,0583^4 - 2,9509 \times 0,0583^5 + 0,5262 \times 0,0583^6) = 5,26 \approx 5,3(\Omega) \quad (13)$$

Индекс «1» означает в данном случае первый расчёт. После первого приближения сопротивление лампы составило  $R_{л1} \approx 5,3 \Omega$ ;  $R_{пл}=24,0 \Omega$  – следует из формулы (8). Итак, теперь нужно повторить расчёты по пунктам 4, 5, 6, 7 и 8, используя в качестве сопротивления лампы уточненную величину  $R_{л1}=5,3 \Omega$ :

$$R_o = R_{л} + R_z = 5,3 + 25 = 30,3(\Omega)$$

$$U_o = U_o \frac{R_z}{R_o} = 17,3 \times \frac{25}{30,3} = 14,27 \approx 14,3(\text{В})$$

$$U_{л} = U_o - U_o = 17,3 - 14,3 = 3,0(\text{В})$$

$$u = \frac{U_{л}}{U_{пл}} = \frac{3,0}{12} = 0,25$$

$$R_{л2} = R_{пл}(0,1153 + 1,8333u - 0,7135u^2 - 3,1184u^3 + 5,3086u^4 - 2,9509u^5 + 0,5262u^6) = 24,0 \times (0,1153 + 1,8333 \times 0,25 - 0,7135 \times 0,25^2 - 3,1184 \times 0,25^3 + 5,3086 \times 0,25^4 - 2,9509 \times 0,25^5 + 0,5262 \times 0,25^6) = 11,96 \approx 12,0(\Omega)$$

В данном случае имеем расчёт «по циклу». Первоначально сопротивление лампы было задано  $R_{л0}=1,0 \Omega$ , после первого расчёта сопротивление лампы составило  $R_{л1}=5,3 \Omega$ , второе приближение дало результат  $R_{л2}=12,0 \Omega$ . Пропустим расчётные выкладки и покажем лишь последующие результаты, после третьего приближения –  $R_{л3}=16,6 \Omega$ , после четвёртого

приближения –  $R_{л4}=18,1 \Omega$ , после пятого приближения –  $R_{л5}=18,5 \Omega$ . Следующий, шестой расчёт покажем опять подробно:

$$R_o = R_{л} + R_{г} = 18,5 + 25 = 43,5(\Omega)$$

$$U_o = U_{г} \frac{R_{г}}{R_o} = 17,3 \times \frac{25}{43,5} = 9,94 \approx 9,9(в)$$

$$U_{л} = U_o - U_{г} = 17,3 - 9,9 = 7,4(в)$$

$$u = \frac{U_{л}}{U_{пл}} = \frac{7,4}{12} = 0,6167$$

$$R_{л6} = R_{пл} (0,1153 + 1,8333u - 0,7135u^2 - 3,1184u^3 + 5,3086u^4 - 2,9509u^5 + 0,5262u^6) = 24,0 \times (0,1153 + 1,8333 \times 0,6167 - 0,7135 \times 0,6167^2 - 3,1184 \times 0,6167^3 + 5,3086 \times 0,6167^4 - 2,9509 \times 0,6167^5 + 0,5262 \times 0,6167^6) = 18,64 \approx 18,6(\Omega)$$

Как видно, разница между 5-ым и 6-ым приближениями составила менее 0,5%, т.е. дальнейший расчёт по определению сопротивления лампы можно прекратить. Итак, окончательно получаем  $R_{л}=18,6 \Omega$ . Кроме того, из последнего (шестого) расчёта следует зафиксировать: общее сопротивление нагрузки  $R_o=43,5 \Omega$ , напряжение на динамике  $U_{д}=9,9 В$  и напряжение на лампе  $U_{л}=7,4 В$ .

После того, как методом последовательных приближений было определено сопротивление лампы (для режима  $k=2$ ) – дальнейшее решение задачи становится совсем простым.

9. Определим относительную мощность на динамике:

$$n_o = \frac{U_o^2}{R_{г} N_{н}} = \frac{9,9^2}{25 \times 6} = 0,653 \approx 0,65 \quad (14)$$

где:  $U_{д}=9,9 (В)$  – напряжение на динамике,  $R_{г}=25,0 (\Omega)$  – полное сопротивление динамика,  $N_{н}=6,0 (Вт)$  – номинальная мощность динамика.

10. Наконец, последняя формула. Определим спад чувствительности динамика:

$$S = 10 \lg \left( \frac{n_d}{k} \right) = 10 \lg \left( \frac{0,65}{2} \right) = -4,88 \approx -4,9(db) \quad (15)$$

Здесь продемонстрирован алгоритм поверочного расчёта. Расчёт был проведён только для одной «точки» перегрузочной характеристики, сформулируем окончательные итоги расчёта – для коэффициента перегрузки  $k=2$  получаем относительную мощность на динамике  $n_{д}=0,65$ , т.е. если усилитель мощности «выдаёт» на выходе напряжение, при котором высокочастотный динамик 6ГДВ-6-25 будет испытывать перегрузку 200% ( $k = 2$ ), то при включённой последовательно лампе накаливания «12В х 6Вт» и том же напряжении на выходе усилителя мощность на динамике составит всего 65% от номинальной мощности динамика ( $n_{д}=0,65$ ); спад чувствительности динамика составит  $-4,9 db$ , общее сопротивление нагрузки при этом равно  $43 \Omega$  (округлим результат до целого значения), а напряжение на лампе будет составлять  $7,4 В$ .

Запрограммируем этот математический алгоритм на компьютере, и рассчитаем характеристики устройства защиты для высокочастотного динамика 6ГДВ-6-25 с различными лампами накаливания. Сведём результаты в таблицу № 2.

Проанализируем характеристику для лампы «12В х 6Вт». При 4х-кратной перегрузке мощность на динамике примерно равна номинальной, а напряжение на лампе равно 12 вольтам. Это не удивительно, т.к. в данном случае использована лампа, параметры которой были рассчитаны по упрощённому расчёту, см. формулу (1). Снижение чувствительности динамика с этой лампой при умеренных мощностях равно – (2-3) dB, а среднее общее сопротивление нагрузки в диапазоне мощностей  $k = (0-1)$  равно примерно  $34 \Omega$ , т.е. на одну треть больше сопротивления динамика.

Проанализируем влияние рабочего напряжения лампы на перегрузочную характеристику. Так, если применить лампу с рабочим напряжением в 1,5 раза меньше, см. характеристику для лампы «9В х 6Вт», то очевидно, что перегрузочная способность такой системы снижается в 2 раза. При этом снижение чувствительности динамика происходит в меньшей степени. Напротив, увеличение рабочего напряжения лампы в 1,5 раза приводит



увеличению перегрузочной способности системы защиты и более значительному снижению чувствительности динамика, см. характеристику для лампы «18В х 6Вт».

Первые три перегрузочные характеристики из таблицы № 2 (для ламп «12В х 6Вт», «9В х 6Вт» и «18В х 6Вт») для наглядности показаны на графике, см. рис. 3. Видно, что при использовании лампы «12В х 6Вт» перегрузочная способность примерно равна четырём (при коэффициенте  $k=4$ ,  $n_d \approx 1$ , см. кривую 1 на рисунке). Аналогично, лампа «9В х 6Вт» обеспечит только защиту от 2х-кратной перегрузки, см. кривую 2.

Очевидно, что упрощённый расчёт по формуле (1) дает очень хороший результат. Лампа, соответствующая именно такому расчёту (см. кривую 1), обеспечивает приемлемые результаты как с точки зрения защиты высокочастотного динамика от перегрузки, так и не вносит существенного влияния на работу динамика: снижение чувствительности динамика при умеренных мощностях составляет – (2-3) db, а увеличение сопротивления нагрузки при мощностях  $k=(0-1)$  происходит примерно на одну треть от полного сопротивления динамика.

Таблица № 2

**Расчетные характеристики устройства защиты высокочастотного  
динамика 6ГДВ-6-25 с различными лампами накаливания**

12В x 6Вт	k	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	
	n <sub>д</sub>	0	0,07	0,15	0,24	0,32	0,39	0,65	0,88	1,05	1,15	1,21	
	S(db)	-0,9	-1,6	-2,3	-3,2	-3,7	-4,1	-4,9	-5,3	-5,9	-6,4	-6,7	
	R <sub>o</sub> (Ω)	27,8	30,1	32,7	36,1	38	40	43	46	49	52	54	
	U <sub>л</sub> (В)	0	0,7	1,5	2,7	3,7	4,6	7,4	9,7	12,0	14,3	16,1	
9В x 6Вт	k	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	
	n <sub>д</sub>	0	0,08	0,19	0,34	0,47	0,58	1,02	1,42	1,75	2,0	2,2	
	S(db)	-0,5	-0,8	-1,1	-1,7	-2,1	-2,3	-2,9	-3,2	-3,6	-4,0	-4,3	
	R <sub>o</sub> (Ω)	26,6	27,5	28,5	30,3	32	33	35	36	38	40	41	
	U <sub>л</sub> (В)	0	0,4	0,8	1,5	2,2	2,9	5,0	6,6	8,3	10,1	11,7	
18В x 6Вт	k	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	8
	n <sub>д</sub>	0	0,04	0,08	0,12	0,15	0,18	0,28	0,37	0,44	0,48	0,51	0,61
	S(db)	-2,0	-3,7	-5,1	-6,3	-7,1	-7,5	-8,5	-9,1	-9,6	-10,2	-10,7	-11,2
	R <sub>o</sub> (Ω)	31,7	38,3	44,8	51,8	56	59	66	71	76	81	86	90
	U <sub>л</sub> (В)	0	1,4	2,7	4,5	5,9	7,1	10,8	13,8	16,4	19,0	21,2	25,0
12В x 4Вт	k	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4			
	n <sub>д</sub>	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,24	0,39	0,48	0,55			
	S(db)	-1,4	-2,9	-4,2	-5,3	-5,8	-6,2	-7,1	-8,0	-8,6			
	R <sub>o</sub> (Ω)	29,5	35,0	40,4	46,0	49	51	56	62	68			
	U <sub>л</sub> (В)	0	1,1	2,3	4,0	5,2	6,2	9,7	12,7	15,5			
12В x 10Вт	k	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4	5	6	8
	n <sub>д</sub>	0	0,08	0,20	0,37	0,51	0,63	1,08	1,5	2,0	2,3	2,6	3,1
	S(db)	-0,6	-0,8	-1,0	-1,4	-1,7	-2,0	-2,7	-3,0	-3,2	-3,4	-3,6	-4,1
	R <sub>o</sub> (Ω)	26,7	27,3	28,1	29,3	30	32	34	35	36	37	38	40
	U <sub>л</sub> (В)	0	0,4	0,7	1,3	1,9	2,5	4,6	6,2	7,6	9,0	10,3	13,2
9В x 4Вт	k	0	0,1	0,25	0,5	0,75	1	2	3	4			
	n <sub>д</sub>	0	0,07	0,15	0,24	0,32	0,40	0,69	0,87	1,03			
	S(db)	-0,8	-1,5	-2,3	-3,2	-3,6	-3,9	-4,6	-5,4	-5,9			
	R <sub>o</sub> (Ω)	27,5	29,9	32,7	36,1	38	40	43	47	49			
	U <sub>л</sub> (В)	0	0,6	1,4	2,7	3,6	4,5	7,2	9,8	12,1			

Вернёмся к таблице № 2 и проанализируем, как влияет мощность лампы на перегрузочную характеристику. Если посмотреть на характеристики с лампами «12В х 4Вт» и «12В х 10Вт», то станет ясно, что такие лампы плохо подходят для защиты динамика 6ГДВ-6-25. Снижение мощности лампы (при том же рабочем напряжении лампы) приводит к увеличению степени защиты, но при этом напряжение на лампе быстро превышает допустимый уровень. Увеличение же мощности лампы приводит к снижению степени защиты.

Интересный результат получается, если снизить рабочее напряжение лампы в 1,5 раза по сравнению с расчетом по формуле (1) и одновременно в 1,5 раза уменьшить мощность лампы. Посмотрите на характеристику в таблице для лампы «9В х 4Вт». Эта характеристика аналогична характеристике для лампы «12В х 6Вт», за исключением напряжения на лампе – данный вариант также имеет 4х-кратный запас по перегрузке, но на этом максимальном режиме напряжение на лампе превышает рабочее примерно на 30%. Этот вариант заслуживает применения!

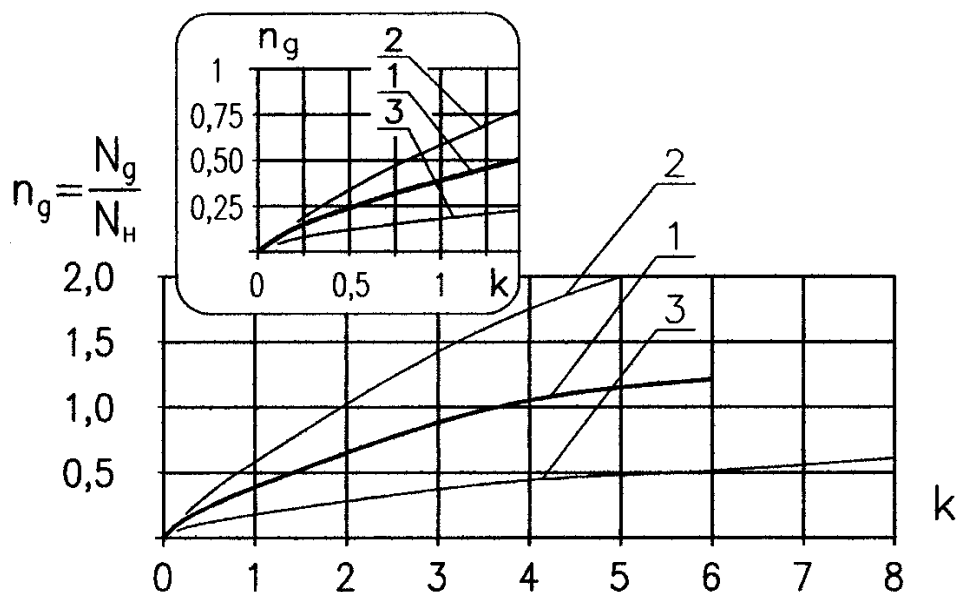


Рис. 3. Перегрузочные характеристики системы защиты динамика 6ГДВ-6-25 различными лампами накаливания: 1 (толстая линия) – лампа «12В х 6Вт», 2 – лампа «9В х 6Вт» и 3 – лампа «18В х 6Вт». В верхней части в увеличенном виде представлены характеристики при малых уровнях мощности. Пояснения в тексте.

*Комментарий.* Необходимо сделать несколько рекомендаций по применению алгоритма «поверочного расчёта».

Во-первых. В таблице фигурирует расчётная точка, когда  $k=0$ , так вот, при такой постановке исходного значения невозможно произвести расчёт по формуле (15), т.к. в этом случае возникает невыполнимая для калькулятора и компьютера операция «деление нуля на ноль». При расчёте данной точки следует вместо нуля задать «бесконечно малую» величину. Если говорить конкретно, то вместо нуля следует задать, например,  $k=0,0001$  – этого вполне достаточно для устранения неопределённости в расчёте, а полученный результат будет соответствовать режиму  $k=0$ .

Во-вторых. При расчёте следует постоянно следить за напряжением на лампе, а точнее, чтобы это напряжение не превышало 30-35% от рабочего напряжения лампы. В алгоритме поверочного расчёта использована «характеристика лампы» по формуле (7), которая имеет область применения  $u = (0-1,3)$ . Если напряжение на лампе превышает рабочее напряжение более чем на 50%, то весь расчёт не имеет смысла, т.к. в этом случае расчётная точка находится вне зоны действия формулы (7), более того на этом режиме лампа накаливания элементарно перегорит!

Наконец, в-третьих. Погрешность формулы «характеристики лампы» составляет  $\pm 15\%$ , это, разумеется, влияет на общую погрешность расчёта. Кроме того, в расчёте не учитываются индуктивность звуковой катушки динамика и так называемая «противо-ЭДС». Тем не менее, изложенный здесь поверочный расчёт, несмотря на указанные погрешности и некоторые упрощения, безусловно, можно и следует применять.

## ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

Применение миниатюрной низковольтной лампы накаливания для защиты высокочастотного динамика даёт большой эффект. «Упрощённый расчёт», см. формулу (1), позволяет определить параметры лампы, которая обеспечивает 4х-кратную защиту динамика от перегрузки! При этом снижение чувствительности динамика при умеренных мощностях составляет  $-(2-3)$  db, а увеличение общего сопротивления нагрузки составляет примерно 30-35%

от полного сопротивления динамика. Данные параметры лампы можно считать близкими к оптимальным.

Для радиолюбителей, не владеющих в полной мере математикой, приведем в таблице № 3 параметры ламп накаливания для нескольких высокочастотных динамиков отечественного производства. Параметры этих ламп рассчитаны по формуле (1). Скажем также, что параметры ламп даны (без округления результатов) в виде «напряжения и мощности», причём в скобках справа указан для справки также и рабочий ток лампы.

Таблица № 3

**Расчетные параметры ламп накаливания для высокочастотных динамиков отечественного производства для случая 4х-кратной перегрузки**

Марка динамика	Расчетные параметры лампы
3ГДВ-1-8 (2ГД-36)	4,0В x 2Вт (0,50 А)
4ГДВ-1-8 (3ГД-47)	4,9В x 3Вт (0,61 А)
5ГДВ-1-8 (3ГД-31)	4,9В x 3Вт (0,61 А)
6ГДВ-1-16 (3ГД-2)	6,9В x 3Вт (0,43 А)
6ГДВ-4-8 (6ГД-13)	6,9В x 6Вт (0,87 А)
6ГДВ-6-16 (10ГД-35)	9,8В x 6Вт (0,61 А)
6ГДВ-6-25 (10ГД-35)	12,2В x 6Вт (0,5 А)
10ГДВ-4-16 (10ГД-43)	12,6В x 10Вт (0,79 А)
10ГИ-1	6,3В x 10Вт (1,58 А)

Конечно, данные результаты следует округлять до ближайших стандартных значений напряжений и мощности (или тока) ламп накаливания. Возникает вопрос: «Где брать такие лампы?» Дадим некоторую информацию по этому вопросу. Отечественные лампы накаливания для небольших фонарей обычно имеют напряжение 2,5 В, 3,5 В или 6,5 В, и при этом они имеют небольшую мощность 1-2,5 Вт. Существуют так называемые «мотоциклетные» лампы с рабочим напряжением 6 В, мощности у таких ламп колеблются в широких пределах (2-20 Вт). Наиболее широкий ассортимент у автомобильных ламп на рабочее напряжение 12 В. Имеются так называемые «приборные» лампы, т.е. лампы, которые используются в различных приборах и устройствах, рабочее напряжение у них составляет 24 В, 26 В, 36 В. Как это ни странно, но в автомагнитолах применяют лампы накаливания с рабочим напряжением 9 В! Среди импортных ламп накаливания можно найти лампы с рабочим напряжением, которое не встречается у отечественных ламп (например, на рабочее напряжение 4,8 В и др.)

И ещё небольшая информация: параллельное соединение двух одинаковых ламп даёт результат, аналогичный применению лампы с таким же рабочим напряжением и увеличенной в 2 раза мощностью, а последовательное соединение двух одинаковых ламп даёт результат, аналогичный применению лампы с увеличенными в 2 раза рабочим напряжением и мощностью.

**«Поверочный расчёт»** позволяет рассчитать перегрузочную характеристику системы защиты для произвольно заданной лампы накаливания. Этот расчёт позволяет рассчитать не только степень защиты, но и уровень снижения чувствительности динамика и общее сопротивление нагрузки при различных мощностях. Этот расчёт очень полезен для конструкторов акустических систем и людей, занимающихся их эксплуатацией.

В ЗАКЛЮЧЕНИЕ скажем несколько слов о разделительных фильтрах. Как уже было сказано, при использовании ламп, рассчитанных по формуле (1) или взятых из таблицы № 3, происходит снижение чувствительности динамика на  $-(2-3)$  dB, а общее сопротивление нагрузки возрастает на 30-35% по отношению к полному сопротивлению динамика. Это необходимо учитывать при расчёте разделительных фильтров и аттенюаторов.

Ещё немаловажная деталь. Поскольку при использовании лампы накаливания сопротивление нагрузки при работе постоянно меняется (и зависит от мощности), то не следует применять разделительные фильтры высоких порядков. Целесообразно применять разделительные фильтры 1-го порядка или 2-го порядка.