

Расчет шума входных каскадов на примере Peavey 5150 Combo

Шум в резисторах

Резисторы генерируют два типа шума: шум Джонсона и избыточный шум.

Шум Джонсона (также называется **тепловой шум**) происходит вследствие хаотичного движения носителей заряда, из-за которого на концах проводника возникают флуктуации напряжения, и чем больше температура, тем больше шум. Для вычислений это моделируется как шумовой генератор напряжения последовательно с резистором, или как токовый генератор шума параллельно с ним. Шум Джонсона является белым шумом (равномерно распределенный по всему частотному диапазону), среднеквадратическое шумовое напряжение или ток, произведенный резистором, описывается формулой:

$$v_j = \sqrt{4kTRB} \quad (1)$$

$$i_j = \sqrt{4kTB/R} \quad (2)$$

где:

k - постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

T - абсолютная температура резистора в Кельвинах

R - сопротивление, Ом

B - полоса частот, Гц

Избыточный (еще называется **фликкер** и иногда **розовый**) шум так называется, потому что он существует в дополнение к основному шуму Джонсона и возникает, из-за эффекта флуктуации сопротивления, когда через резистор протекает ток.

Наиболее яркий пример розового шума – это шум пролетающего вертолета.

Этот вид шума очень изменчивый и непредсказуемый, имеет спектр приблизительно $1/f$ и сильно зависит от конструкции резистора. Он обычно сильнее в маломощных резисторах с высоким сопротивлением.

Шум пропорционален напряжению на резисторе, таким образом, характеристики резисторов могут дополняться параметром мкВ/В на декаду. Другими словами, число микровольт шума, произведенного на один вольт и на одну декаду частоты.

Число декад в данной полосе частот

$$\log(f_2 / f_1)$$

где:

f_2 и f_1 – верхнее и нижнее значение частотного спектра соответственно.

Тип резистора	Избыточный шум мкВ/В на декаду
Проволочный	<0,01
Металлопленочный MF	0,01- 0,3
Металлооксидный MO	0,1 - 1,0
Углеродистый CF	0,01- 0,5
Композитный CC	0,1 - 3,0

Для примера, металлопленочный анодный резистор 220 кОм Vishay CMF, имеющий нормированное значение шума 0,10 мкВ/В, при напряжении 90 В и полосе от 20 Гц до 10 кГц будет генерировать избыточный шум:

$$v_e = 0,1 \cdot 90 \cdot \log(10000 / 20) = 24 \text{ мкВ}$$

$$i_e = 24 \text{ мкВ} / 220 \text{ кОм} = 0,11 \text{ нА} \quad (3)$$

а максимальный шум композитного резистора:

$$v_e = 3 \cdot 90 \cdot \log(10000 / 20) = 729 \text{ мкВ}$$

$$i_e = 729 \text{ мкВ} / 220 \text{ кОм} = 3,3 \text{ нА} \quad (3.1)$$

Шум в триодах

Шум в триодах имеет два главных источника (без учета фоновых шума от накала): дробовый шум и фликкер-шум. Другие учебники могут говорить о наведенном шуме сетки, но он на звуковых частотах малозначим, так как лампа работает со смещением и сеточный ток не протекает).

Дробовый шум вызывается дискретным движением зарядов, которое приводит к статистической флуктуации анодного тока. Является формой белого шума. Мы можем представить это как эквивалентный шумовой ток в аноде. Среднеквадратическое значение дробового шума определяется:

$$i_s = 0.8 \sqrt{4kT_k g_m B}$$

где:

k - постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

T_k - температура катода, обычно 1050К

g_m – крутизна характеристики лампы в Сименсах или А/В

B – полоса частот, Гц

Фликкер-шум происходит из-за случайных изменений в эмиссии катода и менее предсказуем, чем дробовый. Он значительно варьируется с образцами ламп и их старением. Среднеквадратическое значение фликкер-шума на частоте f :

$$i_f = \sqrt{K I_a / f}$$

Он обратно пропорционален частоте, таким образом, это - $1/f$ шум (или розовый). Так как шум не постоянен от частоты, мы должны проинтегрировать предыдущее выражение, если мы хотим найти среднеквадратический ток фликкер-шума в полосе большей, чем 1 Гц:

$$i_f = \sqrt{K I_a^2 \ln(f_2/f_1)} \quad (4)$$

где:

K – эмпирический коэффициент, который обычно варьируется между 10^{-13} для исключительно тихого образца и 10^{-12} для посредственного

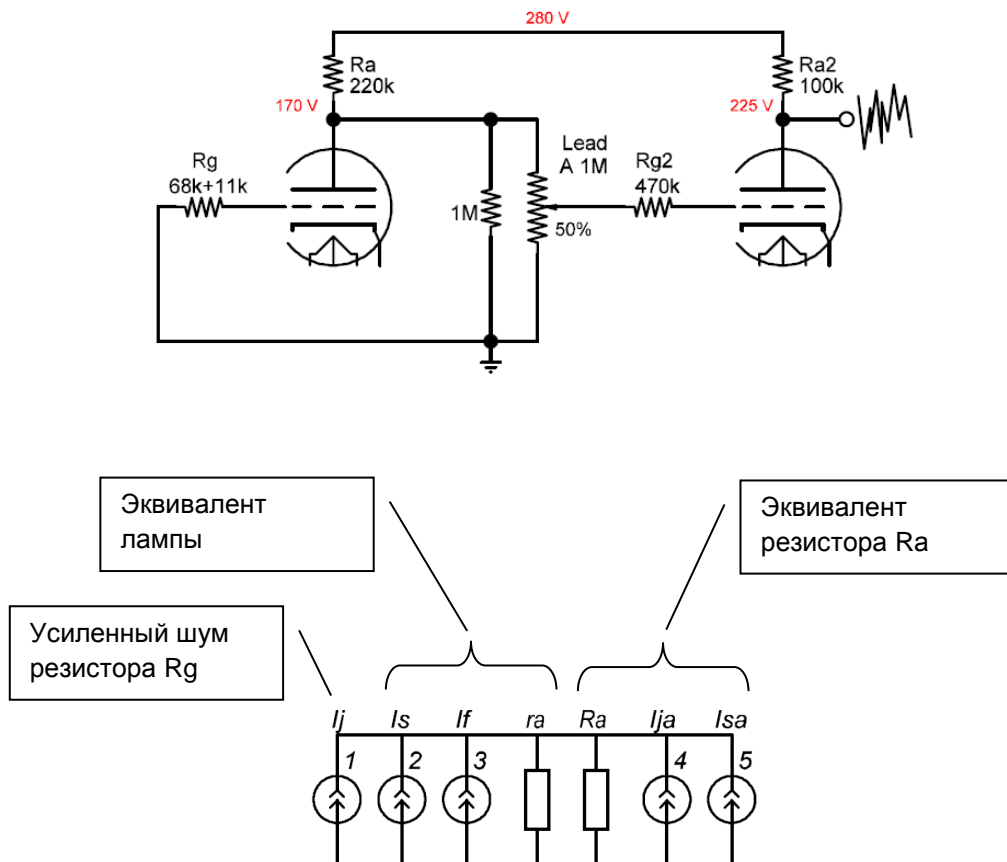
I_a – анодный ток, А

f_2 – верхнее значение частотной полосы

f_1 - нижнее значение полосы

На звуковых частотах фликкер-шум намного сильнее, чем дробовый и пропорционален току анода. Мы могли бы попытаться уменьшить шум, работая при малых анодных токах, но это уменьшит усиление. Эти два параметра работают друг против друга, и в итоге обычные аудио триоды дают более или менее то же самое отношение С/Ш при типовых условиях, по крайней мере для данного уровня сигнала.

Расчет шума во входном каскаде Peavey



На рисунке показывает типичный входной каскад и его эквивалентная схема. Есть пять источников шума:

1. Шум резистора R_g . Это шум в цепи сетки, который будет усилен, и добавит шумовой ток в цепь анода.
2. Дробовый шум лампы.
3. Фликкер-шум лампы.
4. Шумовой ток, производимый анодным резистором.
5. Избыточный шум анодного резистора R_a .

Внутреннее анодное сопротивление лампы r_a это не физический резистор, таким образом, он не производит собственного шума. Но он влияет на усиление, и поэтому должен быть включен в модель. Шум катодного резистора шунтирован конденсатором. Если бы этого не было, то его шум должен был быть добавлена к R_g , но так как этот резистор маленький, его вклад незначителен.

Для упрощения предположим, что частотная характеристика плоская от 20 Гц до 10 кГц. Мы также предположим, что триод посредственный, который производит большой фликкер-шум, т.е. $K = 10^{-12}$. Другие параметры для расчета приведены ниже:

Окружающая температура (T)	300 K
Температура катода (T_k)	1050 K
Крутизна характеристики g_m	1,5 мА/В
Сопротивление лампы r_a	65 кОм
Верхняя частота (f_2)	10 кГц
Нижняя частота (f_1)	20 Гц
Анодный ток (I_a)	0,4 мА
Усиление (A)	64

Здесь усиление первого каскада A берется чуть ниже (чем 68 при анодном резисторе 220 кОм), поскольку он нагружен на регулятор Lead. Суммарная нагрузка по переменному току задается параллельным включением анодного резистора 220 кОм и нагрузки 500 кОм, то есть будет 150 кОм.

Поскольку источники шума некоррелированные, то чтобы найти итоговое значение, сначала найдем все отдельные токи:

1. Шум R_g найдем по формуле (1):

$$v_j = \sqrt{4 * 1,38 * 10^{-23} * 300 * 79000 * 9980} = 3,6 * 10^{-6} \text{ или } 3,6 \text{ мкВ}$$

Это напряжение появляется на сетке и умноженное на g_m , формирует ток в выходной цепи.

$$i_j = v_j * g_m = 3,6 * 10^{-6} * 0,0015 = 5,4 \text{ нА}$$

2. Дробовый шум в аноде, считаем по формуле (2):

$$i_s = 0,8 \sqrt{4 * 1,38 * 10^{-23} * 1050 * 0,0015 * 9980} = 0,75 * 10^{-9} \text{ или } 0,75 \text{ нА}$$

3. Фликкер-шум в аноде считаем по формуле (4):

$$i_f = \sqrt{10^{-12} * 0,0004^2 * \ln(10000/20)} = 1,0 * 10^{-9} \text{ или } 1,0 \text{ нА}$$

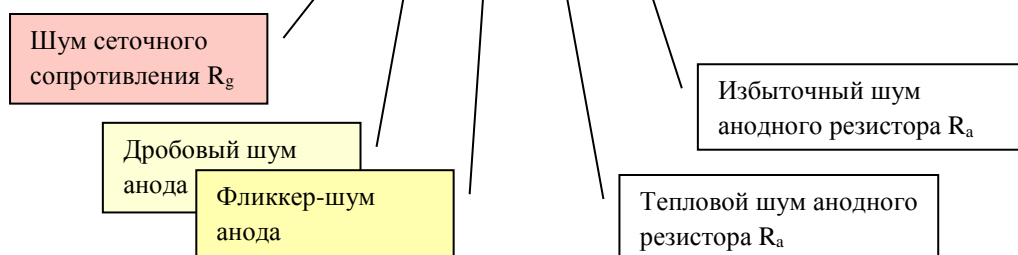
4. Тепловой шум анодного резистора R_a считаем по формуле (2)

$$i_{ja} = \sqrt{4 * 1,38 * 10^{-23} * 300 * 9980 / 220000} = 27 * 10^{-12} \text{ или } 0,027 \text{ нА}$$

5. Избыточный шум анодного металлооксидного резистора был рассчитан ранее (3).

Применив формулу среднеквадратического суммирования, и добавив посчитанный ранее максимальный избыточный шум анодного резистора, получим итоговый ток в аноде:

$$i = \sqrt{i_j^2 + i_s^2 + i_f^2 + i_{ja}^2 + i_{sa}^2} = \sqrt{5,4^2 + 0,75^2 + 1,0^2 + 0,027^2 + 0,11^2} = 5,5 \text{ нА}$$



Здесь наглядно виден вклад каждого источника шума в общую картину.

Основной шум идет от сопротивления R_g и его незначительно дополняет фликкер и дробовый шум лампы. Остальным можно пренебречь. Но если будет использован винтажный композитный резистор (3.1), то он определенно будет услышан. Розовый шум имеет хороший терапевтический эффект при лечении неврозов и депрессий.

Суммарный ток протекает через параллельное соединение R_a и r_a (и еще через входные цепи следующего каскада, поэтому примем $R_a = 150$ кОм. Шум от входных цепей учтем при анализе второго каскада) и производит шумовое напряжение:

$$v = i * R = 5,5 \text{ нА} * (150 * 65) / (150 + 65) = 249 \text{ мкВ}$$

Мы можем пересчитать это в эквивалент шумового напряжения на входе, разделив полученное значение на коэффициент усиления первого каскада

$$EIN = v / A = 249 \text{ мкВ} / 64 = 3,9 \text{ мкВ}$$

Если был бы входной сигнал с уровнем 50 мВ, то отношение сигнал шум

$$SNR = 20 * \log(v_{sig} / v_{noise}) = 82 \text{ дБ}$$

Разумеется, это при отсутствии шума во входном сигнале.

Расчет шума для каскадного включения триодов

Теперь посчитаем тоже самое для второго каскада.

Параллельно регулятору Lead находится резистор 1 мОм, шумом которого можно пренебречь, если включить его в состав первого каскада. Регулятор в положении 6-7 делит полное сопротивление пополам на два по 500 кОм, которые для расчета теплового шума складываются в параллель (здесь для простоты пренебрегаем влиянием r_a первой лампы), т.е. 250 кОм. И если бы Peavey использовал регулятор 500 кОм вместо параллельного включения мегаомных сопротивлений, то вносимый тепловой шум был бы в два раза меньше. Значит шум этого резистора для Peavey не так важен, как формирование частотной характеристики, что мы видели из ответа #92 здесь <https://forum.guitarplayer.ru/index.php?topic=396440.90>

Расчет аналогичен первому каскаду

1. Шум $R_{g2} = 250$ кОм найдем по формуле (1):

$$v_j = \sqrt{4 * 1,38 * 10^{-23} * 300 * 250000 * 9980} = 6,4 * 10^{-6} \text{ или } 6,4 \text{ мкВ}$$

Это напряжение появляется на сетке и умноженное на g_m , формирует ток в выходной цепи.

$$i_j = v_j * g_m = 6,4 * 10^{-6} * 0,0015 = 9,6 \text{ нА}$$

2. Дробовый шум в аноде, считаем по формуле (2):

$$i_s = 0,8 \sqrt{4 * 1,38 * 10^{-23} * 1050 * 0,0015 * 9980} = 0,75 * 10^{-9} \text{ или } 0,75 \text{ нА}$$

3. Фликкер-шум в аноде считаем по формуле (4):

$$i_f = \sqrt{10^{-12} * 0,00055^2 * \ln(10000/20)} = 1,4 * 10^{-9} \text{ или } 1,4 \text{ нА}$$

4. Шум анодного резистора R_{a2} считаем по формуле (2)

$$i_{ja} = \sqrt{4 * 1,38 * 10^{-23} * 300 * 9980 / 100000} = 41 * 10^{-12} \text{ или } 0,041 \text{ нА}$$

5. А во второй каскад добавим супершумящий композитный резистор 100 кОм (55 В падение напряжения) с избыточным шумом 4,4 нА, который рассчитан аналогично (3.1).

Итоговое значение тока:

$$i_2 = \sqrt{i_j^2 + i_s^2 + i_f^2 + i_{ja}^2} = \sqrt{9,6^2 + 0,75^2 + 1,4^2 + 0,041^2} = 11,0 \text{ нА}$$

Сравнивая это значение с первым расчетом, видно, что межкаскадные сопротивления практически доминируют в характере шума второго каскада.

Этот ток протекает через параллельное соединение R_{a2} и r_{a2} и производит шумовое напряжение:

$$v_2 = i_2 * R = 11,0 \text{ нА} * (100 * 65) / (100 + 65) = 433 \text{ мкВ}$$

Пересчитаем это в эквивалент шумового напряжения на входе, разделив полученное значение на коэффициент усиления второго каскада = 60, коэффициент делителя Lead = 0,5 и коэффициент усиления первого каскада:

$$EIN = 433 \text{ мкВ} / (60 * 0,5 * 64) = 0,23 \text{ мкВ}$$

Среднеквадратическое значение шума на входе:

$$v_{total} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{3,9^2 + 0,23^2} = 3,91 \text{ мкВ}$$

И общее отношение С/Ш практически совсем не изменилось.

Следует иметь в виду, что отношение С/Ш хуже в Lead канале усилителя. Это происходит из-за ограничения полезного сигнала, при том, что шум не ограничивается.

При написании использованы материалы книги:

«Designing Valve Preamps for Guitar and Bass», Merlin Blencowe, Second Edition 2012.