

# Как измерить импеданс АС и нарисовать его график.

## Подготовительный этап

Импеданс можно измерить методом вольтметра-амперметра, и методом замещения, в результатах есть небольшая разница, возможно из-за зависимости напряжения и тока от частоты, на ваше усмотрение, но метод замещения я считаю наиболее точным.

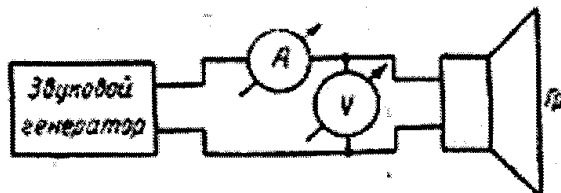


рис.1 Схема для измерения методом вольтметр -амперметра.

Измерения производят так, вращаем ручку генератора звуковой частоты, и записываем показания приборов, а затем по закону Ома вычисляем импеданс. Низкое сопротивление динамика сильно садит напряжение, и не каждый ГСС его сможет обеспечить, для уموощнения используйте усилитель, его коэффициент гармоник роли не играет.

У меня в качестве ГСС используется **JDS6600**, со стабилизированным выходным напряжением до 10 В, это очень удобно, т.к. в процессе работы за ним не надо следить, и регулировать.

На рис.2 схема для измерения методом замещения. Для этой схемы дополнительное сопротивление  $R_{доп.}$  должно быть в 50~100 раз больше паспортного сопротивления громкоговорителя, а замещающее переменное сопротивление  $R_{зам.}$  должно иметь градуировку (единицы и десятки Ом). Можно не градуировать, а точно измерить мультиметром, например, VICTOR VC9808+. Подберите этот потенциометр с хорошим качеством контакта, чтобы во время измерения не бегали цифры. Например, для динамика Klangfilm KL307 сопротивление катушки 13,7 Ом, я взял замещающее сопротивление 330 Ом, а дополнительное поставил 1 кОм. Схема собирается на небольшом куске фанеры за полчаса, у меня она оформлена в коробочку из 3-х слойной фанеры, и оклеена пленкой под дерево.

Вольтметр переменного напряжения, в качестве его удобно применять осциллограф, который очень четко регистрирует резонансы динамика, либо микровольтметр (ВЗ-57), с высокоомным (5 МОм), входом, он тоже четко показывает резонанс, напряжения здесь намного меньше 1 В, поэтому мультиметр не подойдет, он их не измерит, кроме того, они сильно врут после 5 кГц.

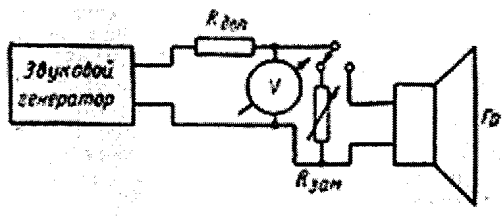


рис. 2 Схема для измерения импеданса методом замещения.

Измерив напряжение на громкоговорителе, включают вместо него замещающее сопротивление и, изменяя его величину, добиваются установки прежнего значения напряжения. При равенстве напряжений, входное сопротивление громкоговорителя равно величине сопротивления, замещающего его.

Все просто и понятно, по этим замерам рисуется график, на котором необходимо определить разбег импеданса от пика до провала в размах (m), он будет использоваться при расчете требуемой альфы, альфа поможет построить наклон линии динамической нагрузки, по которому вычислить

анодную нагрузку, а с ее помощью рассчитать коэффициент трансформации, который, собственно говоря, и согласовывает акустику с усилителем.

Надеюсь понимаете, что у каждой АС свой график импеданса, который требует своего коэффициента трансформации, а не какие-то мифические на 3,5 кОм, 5 кОм и другие, предлагаемые продавцами, и под широкий ассортимент ламп. Поэтому они не спойются, и кто-то из них пойдет доживать свой век в гараж, или на полку антресолей.

И не вздумайте возить свой усилитель по музыкальным салонам и владельцам АС, в надежде сразить их небывалым звуком, можете оконфузиться. То же самое случится при продаже, могут вернуть назад со словами, не играет, и это будет правдой, если продавать, то все вместе, усилитель и АС.

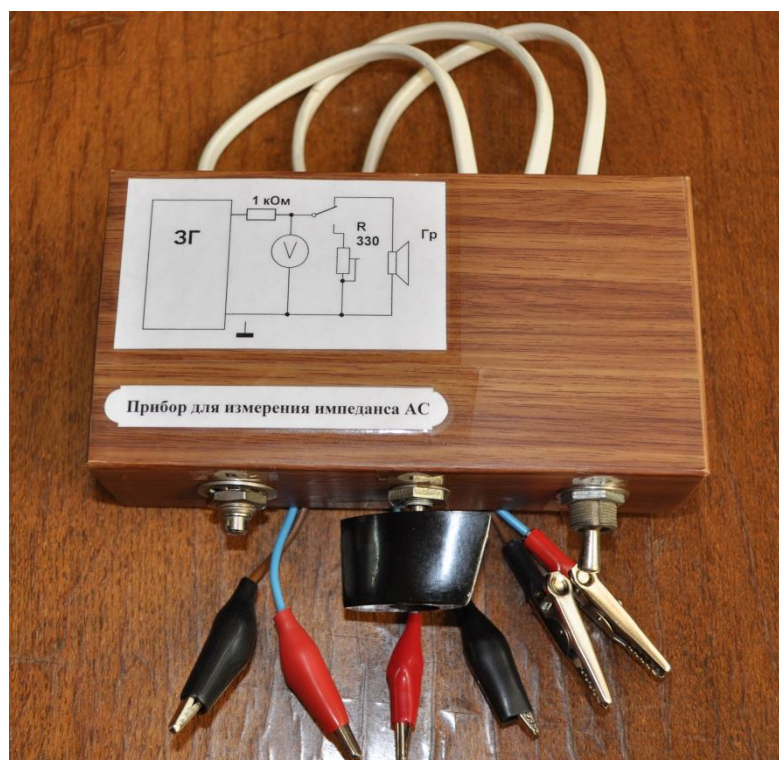


рис.3 Внешний вид прибора. Коробка из фанеры, оклеена пленкой под дерево.



рис.4 Вид сзади.

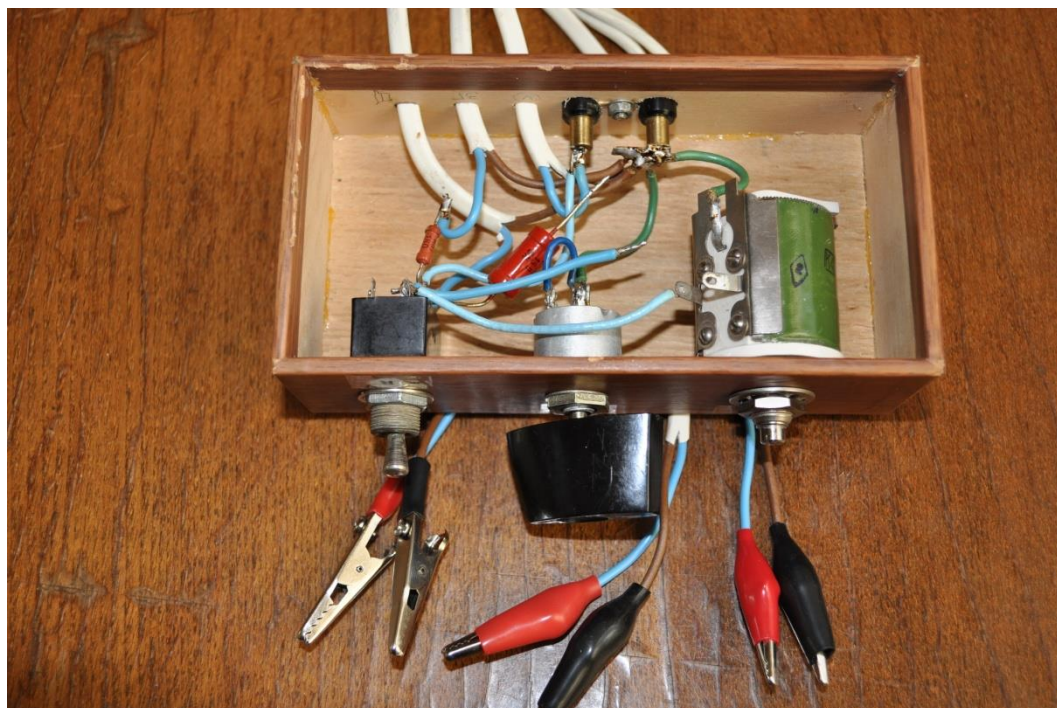


рис.5 Вид изнутри. Два потенциометра под разные импедансы.

При измерении на громкоговорителе устанавливают напряжение около 1 В. Медленно меняя частоту генератора от 20 до 500~1000 Гц, стараясь не пропустить пика импеданса АС, и отмечая точки на графике через 10 Гц на низших частотах и через 100 Гц ~1 кГц далее до 20 кГц. Полученные данные записывают в *Таблицу 1*.

Перед началом измерений необходимо нарисовать шаблон графика логарифмической шкалы, куда будут занесены результаты и начерчена кривая импеданса. Для этого потребуется кусок миллиметровки размерами 275x170 мм и шариковая или гелевая ручки с черной пастой. Декада состоит из 10 штрихов, расстояния между линиями одной декады равны:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расстояние в мм	0	30	48	60	70	78	85	90	95	100

Особенностью логарифмической шкалы является отсутствие нуля, и по этой причине первая вертикальная линия 50 Гц должна отстоять от оси ординат на 10 мм. Последующие декады строят путем повторения первой. При необходимости нулевую отметку можно сдвинуть влево, пользуясь шкалой расстояний. Как правило хватает 30 Гц чтобы миллиметровка поместилась в сканере.

Итак, по горизонтали откладываем частоту, по вертикали Омы, внешний вид шаблона графика изображен на *рис. 6*

По вертикали выберете необходимый масштаб, исходя из максимально получившегося в ходе замеров сопротивления. Следите только за тем, чтобы он не вышел за пределы графика. Поскольку бумага миллиметровка, проблем с масштабированием не будет.

Строим график импеданса путем нанесения на него измеренных точек, затем через них проводим плавную кривую. Из-за неточности измерений, плавность кривой может быть нарушена, это не страшно, скругляйте эти участки, проводя эту линию мимо этих точек. Правильное применение этого правила позволяет получить в ряде случаев более точный результат, чем первичные измерения.

Для того чтобы не потерять полученные данные, точки, по которым строят графики надо делать жирными, гораздо толще самой линии.

Классический вид графика импеданса, или можно сказать и так, правильная АС, имеет один пик на частоте резонанса АС, и плавный подъем в остальном диапазоне. Если горбов много, это свидетельство множественных переотражений от стенок ящика из-за неправильной конструкции АС, или недостаточного количества демпфирующего материала. Либо это является характерной особенностью АС, например задний рупор, в которой из-за большого количества изгибов, всегда



будут присутствовать четвертьволновые резонансы. У фазоинвертора их два, и в промежутке между ними резонанс динамика, левый пик нам не нужен, это резонанс ящика, а вот правый пик для расчетов, его будет преодолевать усилитель.

Это тяжелая нагрузка для усилителя, и уж точно не для пентодного. Если даже горб один, но имеет очень большой импеданс, больше номинального сопротивления в 10 и более раз (обычно это TQWP и щитовая АС), то триодному усилителю его не преодолеть. В противном случае ему понадобится трансформатор с очень большим коэффициентом трансформации, из-за чего громкость окажется неприемлемо малой.

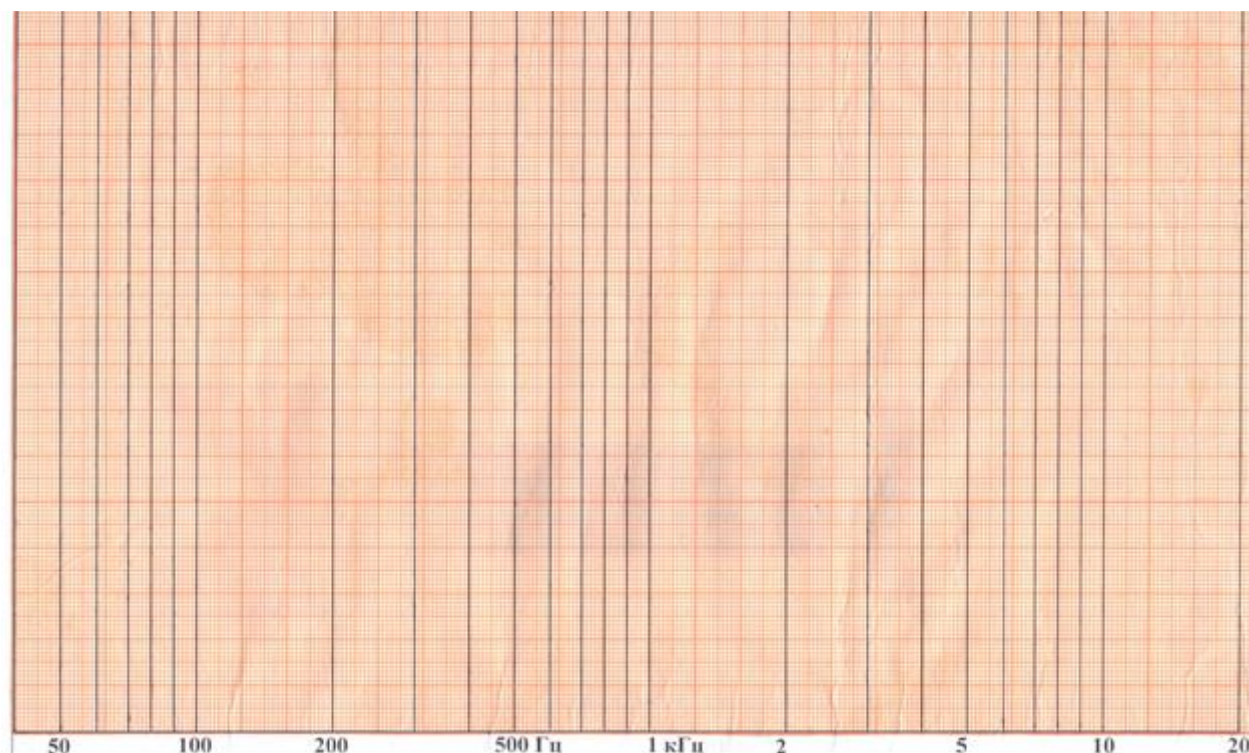


рис.6 Шаблон для построения графика импеданса.

График импеданса АС я считаю гораздо важнее, чем ее АЧХ, он более информативен и играет важнейшую роль в расчетах для согласования усилителя и АС.

### Практическая работа

Потренируемся. В качестве примера воспользуемся данными замера импеданса динамика Klangfilm KL307 в щите (Таблица 1), полученными методом замещения. Паспортное значение сопротивления катушки 13,7 Ом. Пик импеданса 282 Ом, провал 14,5 Ом, разбег (m) составил  $282/14,5 = 19,45$  раза.

Таблица 1

F	50	60	65	70	100	150	200	300	400	500	600	800	1к	2	3	4	5	7	10	20
Uн	0,109	0,583	0,33	0,196	0,06	0,042	0,039	0,039	0,039	0,041	0,042	0,46	0,42	0,047	0,048	0,048	0,048	0,045	0,034	0,017
Rн	40	282	143,5	81	24	16	14,2	14,5	14,7	15	18,9	19	17,5	21,5	24	28,4	31,5	37,8	47	59

Обратите внимание на то, как мало напряжение, не каждым прибором его замеришь, поэтому мультиметр не подойдет. Как оказалось, низкое сопротивление катушки динамика сильно садит выходное напряжение с генератора, но это не страшно, уможняйте любым имеющимся усилителем, включая транзисторные, или используйте один канал стереофонического.

Таким образом, мы только что выполнили важнейшие измерения, для дальнейших расчетов усилителя.

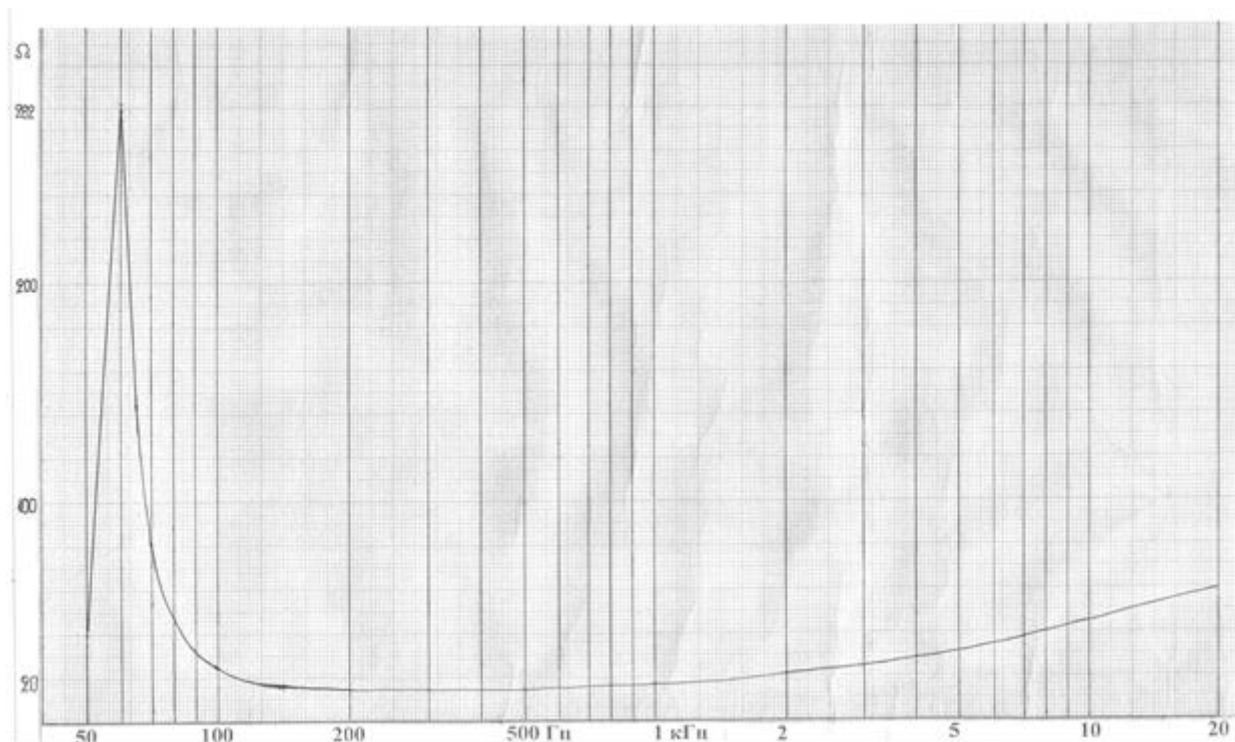


рис.7 График импеданса Klangfilm KL307 в щите 75x121 см и центре динамика 25x79 см.

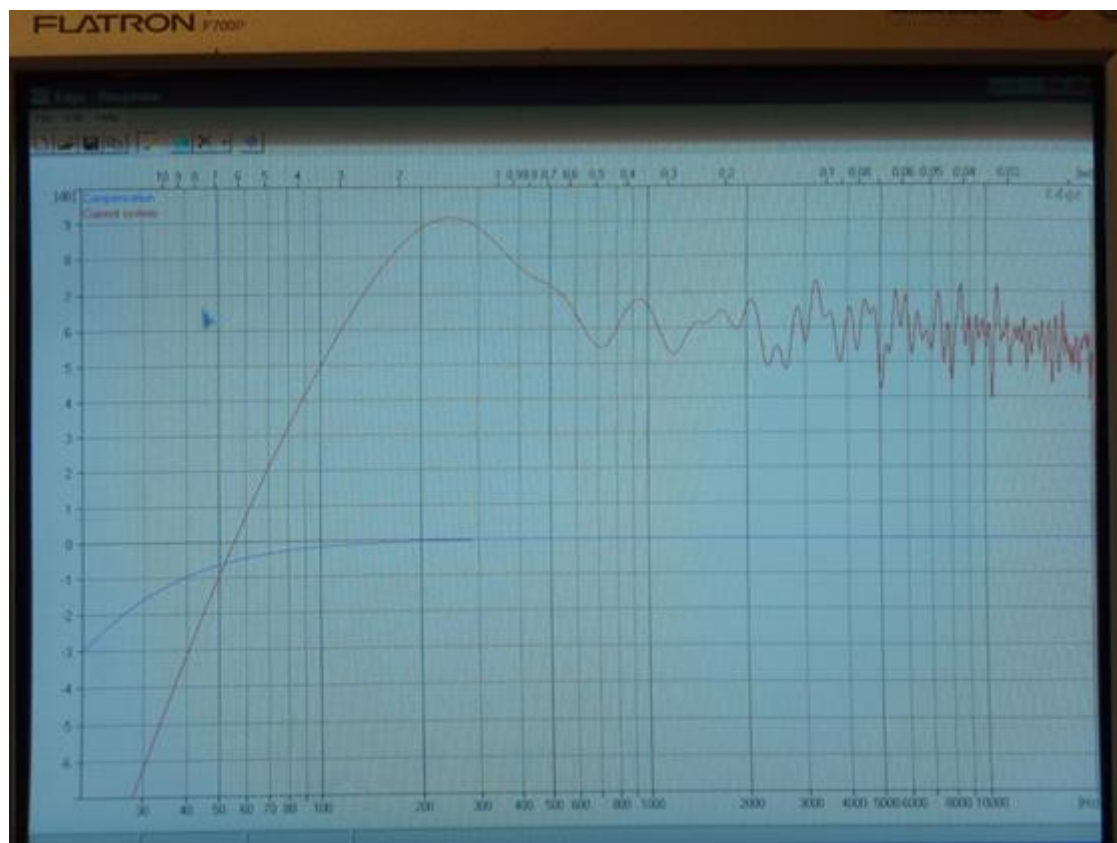


рис.8 Вид с экрана монитора АЧХ нашего щита, полученной с помощью симулятора edge, как видим, при таком расположении динамика в щите, пицалка не требуется. Это 15-й вариант.

Переходим к вычислению альфы ( $\alpha$ ).

Альфа, это отношение анодной нагрузки к внутреннему сопротивлению лампы, величина безразмерна, кто ее придумал, не знаю, но чрезвычайно полезная для расчетов.

$$\alpha = \frac{R_a}{R_i}$$

Для триодных усилителей во времена Hi-Fi ее брали от 3-х до 4-х. Тогда во главу угла ставили большую выходную мощность, качество звучания стояло не на первом месте. Для усилителей класса Hi-End она неприемлема, и ее соотношение должно быть от 13 до 31. Для пентодных усилителей Hi-Fi справочники советуют ее брать от 0,02 до 0,5. Большая альфа нужна для уверенного контроля усилителем акустики, без гудения и бубнения баса. Речь идет о коэффициенте демпфирования, который вычисляется так:

$$K_d = \frac{\eta}{1 + \frac{1}{\alpha} - \eta}$$

В настоящее время для усилителей класса Hi-End, его надо стараться получить не менее 10, иначе высокий потенциал акустики окажется не реализованным. Для пентодных усилителей его хватает 0,1. Единственное неудобство от такого решения, снижение выходной мощности.

Расчет альфы, это первоначальный этап расчета усилителя в целом. Без его согласования с АС еще на стадии проектирования, не стоит и начинать работу по изготовлению высококачественной аудиосистемы. Иначе усилитель и АС не спойются, и что-то из них пойдет доживать свой век в гараж или в кладовку на антресоли. Расчет альфы выполняется по формуле:

$$\alpha = \frac{10^{\frac{0,05 * X}{m}} - 1}{10^{\frac{0,05 * X}{m}}}$$

X- желаемая неравномерность напряжения на АЧХ в дБ.  
m-разбег импеданса в размах.

Неравномерность напряжения на АЧХ придумаете сами, исходя из собственных амбиций, если они не высокие, то никогда не услышите весь потенциал своей АС, и зачем тогда ее было покупать или делать? Я ее беру обычно в пределах 0,35~0,5 дБ, это потенциал усилителя, который загубит АС, она как всегда является самым слабым звеном аудиосистемы. У промышленных АС она достигает 10~12 и даже 14 дБ, но и оставшаяся величина будет радовать уши, акустика с разбегом импеданса в 2 раза считается очень хорошей, но и дорогая.

Современные, и старые винтажные динамики обладают настолько высокими характеристиками, что было бы глупостью, заплатив за них большие деньги на корню загубить их возможности. А потом начинают жаловаться на то, что его АС не спелась с усилителем.

Для немощных считать такие формулы я помогу. Вначале вычисляете степень, например, решили иметь неравномерность напряжения на АЧХ 0,4 дБ, это 10 в степени 0,02, разбег импеданса (m), у своей АС намерили 3,65 раза. Зайдете в Excel, наберете по-английски вот такой алгоритм счета, =10^0,02 получите 1,047129, и далее на калькуляторе произведете остальные, в результате чего получите требуемую альфу:

$$\alpha = \frac{10^{\frac{0,05 * 0,4}{3,65}} - 1}{10^{\frac{0,05 * 0,4}{3,65}}} = 15,13$$

Для пентодного, надо единицу поделить на эту альфу, и получается 0,07. Это очень высокое требование для триодного усилителя, и не каждый ее осилит, речь идет о снижении громкости,

чем больше альфа-тем тише играет усилитель, для кого-то это будет неприемлемым условием.

Пусть так, знакомая история, в юности переносной магнитофон, в зрелые годы транзисторный усилитель на 100 Вт, в старости ламповый усилитель и рупорная АС. Обычно ближе к старости человек мудреет, и начинает понимать что не в ваттах счастье, а в эмоциях от прослушивания. И чем раньше вы создадите систему своей мечты, тем дольше будете ей наслаждаться. Если к 50~55 годам вы не смогли осуществить свою мечту, то после 60 лет уже пропадает интерес к музыке, все меньше и меньше желания сесть и послушать, отвлекают другие заботы.

С какими сложностями встретится конструктор, если все-таки решится взять такую высоту? Изменение неравномерности напряжения на АЧХ всего лишь на 0,15 дБ потребовали увеличения альфы с 16,026 до 23,085. Даже 16,026 не все лампы могут обеспечить, а 23,085 и подавно. Можно очень легко пролететь с коэффициентом трансформации, делая его наугад или по какой-нибудь схеме из журнала. Я не уверен в том, делал ли автор такой расчет?

К сожалению еще очень мало людей слышали о таком расчете, и тем более способных его выполнить. Этой формуле 69 лет, и уже вымерло поколение аудиофилов решавших ее на логарифмической линейке, а сейчас и подавно никому не надо. И только по этой причине народ плодит никому не нужные усилители, чтобы затем их разобрать или сложить на полку в кладовке. Я их так и называю, антресольная серия.

Мой опыт говорит о том, что альфа 16,026 резко ограничивает ассортимент ламп. Можно попробовать немного схитрить. Взять не пиковое значение импеданса 282 Ом на частоте 60 Гц, все равно щит эти частоты достоверно не воспроизводит, а например 80 Ом, это соответствует частоте 70 Гц. В этом случае  $m = 80/14,5 = 5,517$ , и при неравномерности напряжения на АЧХ 0,5 дБ требуемая альфа составит 13,696. Такую альфу при приемлемой громкости могут обеспечить гораздо большее количество ламп, 6С4С, 6С19П, 300В, 6П13С, 6П45С, ЕС360, 6С33С, ГМ70. А вот такие как УО-186, 2С4С, 2А3 и т.п. не осилят. С такой альфой выходная мощность у них настолько понизится, что потребуются очень высокочувствительная АС, явно больше 92~95 дБ, либо в рупорном оформлении.

Вычислив альфу, надо так построить наклон линии динамической нагрузки, чтобы отношение  $R_a/R_i$  ей соответствовало. Возможно, с первого раза такой наклон не получится, и придется сделать несколько трассировок. Иногда на правильную трассировку линии динамической нагрузки приходится тратить до 8 попыток. Но это важнейшая функция для правильного расчета усилителя, и ей не стоит пренебрегать. Иначе все труды по распиловке фанеры и изготовлению АС, кату под хвост.

Зная альфу, и вычисленную с ее помощью анодную нагрузку ( $R_a$ ), можно приступать к расчету требуемого коэффициента трансформации:

$$n = \sqrt{\frac{R_a * \eta}{R_n}}$$

Для этой формулы  $R_a$  берется из графика АСХ, для триодного усилителя  $R_n$  желательно брать на провале импеданса, в нашем примере это 14,5 Ом, а КПД ( $\eta$ ) рассчитать, используя имеющийся трансформатор.

$$\eta = 1 - \frac{r_1 + r_{p2}}{R_a}$$

$r_1$ -омическое сопротивление первичной обмотки.

$r_{p2}$ -приведенное сопротивление вторичной обмотки.

Приведенное сопротивление ( $r_{p2}$ ) для этой формулы рассчитывается так:

$$r_{p2} = r_2 * n^2$$

$$\eta = 1 - \frac{r_1 + r_{p2}}{n^2 * R_n}$$



$$\eta = \frac{Ra}{Ra + r1 + rp2}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha}}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_d}}$$

$$\eta = \frac{R_n \cdot n^2}{Ra}$$

Если несмотря на обилие приведенных формул для расчета КПД трансформатора вам лень считать, то можно ориентироваться на требования справочников времен Hi-Fi, для усилителей мощностью до 10 Вт его обычно брали 0,85, для современных высококачественных усилителей от 0,94 до 0,98.

Коэффициент трансформации можно вычислить и по этой формуле:

$$n = \sqrt{\frac{Ra - r1 - r2}{R_n}}$$

В нее надо заложить имеющиеся сопротивления обмоток трансформатора и минимальную нагрузку из графика импеданса.

**Таким образом, график импеданса нам нужен для расчета требуемой альфы, альфа нужна для расчета коэффициента трансформации. А правильно выбранный коэффициент трансформации нужен для согласования АС и усилителя во всем диапазоне изменения импеданса нагрузки.**

На самом деле эти расчеты не очень сложные, потренируйтесь, это не только интересно, но и полезно для мозгов, они как мышца, если ее не тренировать, то дряхлеет.

Ниже несколько образцов графиков импеданса в разных акустических оформлениях.

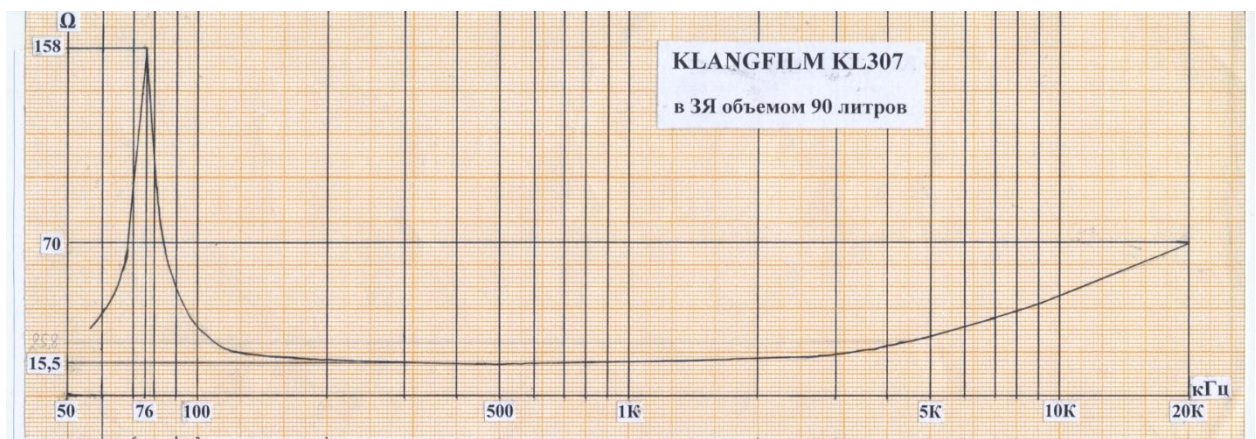


рис. График импеданса KL307 в закрытом ящике.

Как видим, по сравнению со щитом резонанс сдвинут, и пик придавлен, поэтому другой звук, и нужен другой коэффициент трансформации.



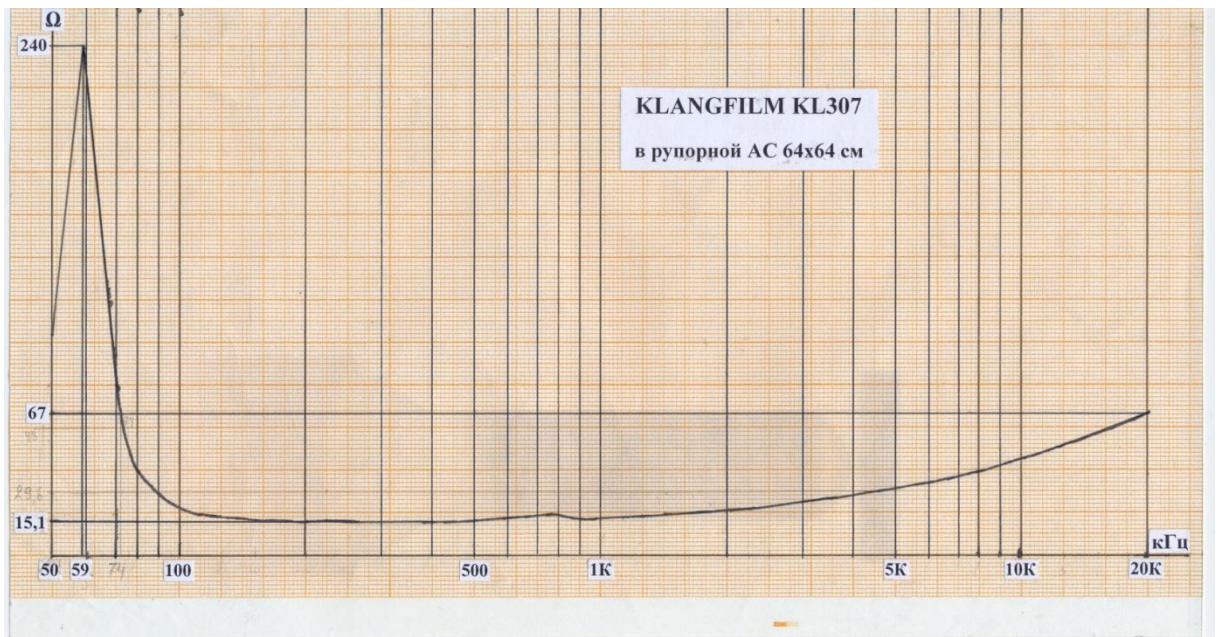


рис. График импеданса KL307 в рупорной АС. Звук, даже не глядя на график, в отпаде.

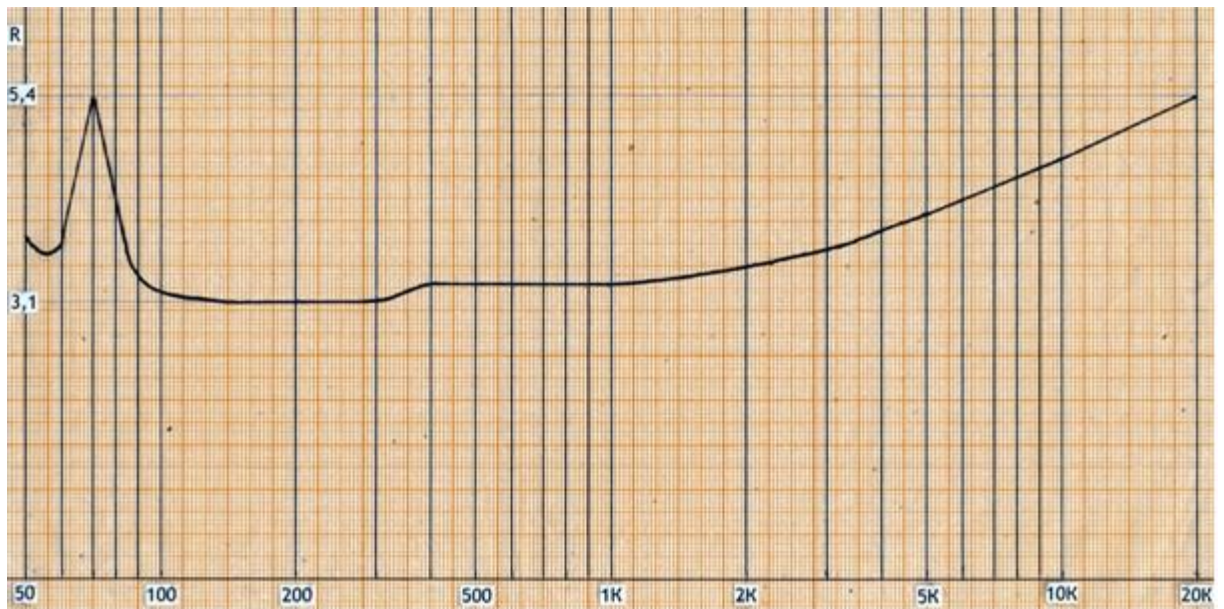


рис. График импеданса радиоприемника высшего класса Фестиваль.

Для него требуемая альфа с неравномерностью напряжения на АЧХ 0,4 дБ:

$$\alpha = \frac{10^{\frac{0,05 * 0,4}{1,74}}}{(10^{\frac{0,05 * 0,4}{1,74}}) - 1} = 8,49$$

Такая альфа требует крутого наклона линии динамической нагрузки, у триодных ВАХ в этом случае получается большая амплитуда тока, который, судя по опытам Лоренца (Лоренцова сила), двигает проводник в магнитном поле, в данном случае катушку динамика, создавая звуковое давление, т.е. громкость получается большой. У этого динамика, 6ГД1 РРЗ, среди отечественных, самое большое звуковое давление, 0,4 Па, характеристическая чувствительность составит 0,4 \*

$3,14 = 1,256$  Па, или в дБ:  $20\log 1,256/0,00002 = 20\log 62800 = 20 * 4,798 = 95,96$  дБ, что соответствует паспортной.



*рис. График импеданса наушников KOSS A/250, 66 Ом на собственной голове.*

Как видим, разбег импеданса всего лишь 1,3 раза, поэтому ровный, сбалансированный звук во всей полосе АЧХ, 20 Гц на них я слышу.

28 сентября 2008 г.

Владимир Большаков