

# Harmonic Restoration

## Restoring Lost Harmonics

(What I am about to recommend here is, paradoxically enough, something I have usually opposed adamantly—namely that notion that tubes make nice distortion and they should be used as a form of tone control. Just about every day, I get an e-mail from someone who owns an all-solid-state system that sounds just too sterile, too brittle, so my advice is sought for what would be the best tube product for producing a fat, smooth tube sound as a sort of sonic overlay. This is just not my cup of tea, for what I like best about tubes is their low distortion. Several decades ago, I was sickened to read an article in a popular electronic magazine that described a solid-state circuit that produced—for those nostalgic that old-time tube sound—a tube-sound generator; the circuit purposely introduced hum, motor-boating, and distortion due to asymmetrical clipping! No thanks.)

## Восстановление потерянных гармоник

*(То, что я рекомендую здесь, как ни парадоксально, то, что я, как правило, против категорически, а именно, что о том, что трубки делают хорошие искажения, и они должны быть использованы в качестве одной из форм контроля тона. Почти каждый день я получаю e-почта от кого-то, кто владеет все-твердотельный систему, которая звучит слишком стерильно, слишком хрупким, так что мой совет разыскивается за то, что бы лучшим продуктом трубка для производства жира, ровное звучание трубы как своего рода звуковой наложения. Это просто не моя чашка чая, за то, что мне нравится больше всего о трубках их низкий уровень искажений. Несколько десятилетий тому назад, я был отвращение прочитать статью в популярном электронного журнала, в которой говорится твердотельный схему, которая производится в обмен на те ностальгические, что старинный ламповый звук-генератор трубка звука; схема преднамеренно ввел гул, водно-моторного спорта, и искажение из-за асимметричного отсечения Нет, спасибо!).*

I am big on restoration, just as I am big on conservation and amelioration (the act of improvement). Surely, if something is worthwhile, then we should strive to conserve it; if something valued has fallen into disrepair, then we should restore it; and if something is disfavored, disobliging, inconvenient, soul-damaging, troublesome, or ugly, then it should be either improved, got rid of, or replaced. (The best philosophical and political systems are those that fit on an index card.) Thus, restoration, the act of getting back, the process of regaining, the attempt at reclamation, recouping, recovery, redemption, repossession, rescue, retrieval, salvage, is usually a noble effort, save for—and once again paradoxically enough—the restoration of the Nobility, the class of persons distinguished by high birth or rank. (No one would want that, right? Or maybe? The modern Olympian impulse and program argues yes, yes, yes!)

*Я большой на реставрации, как и я большой по сохранению и улучшению (акт улучшения). Конечно, если что-то стоящее, то мы должны стремиться к его сохранению; если что-то ценится пришла в упадок, то мы должны восстановить его; и если что-то невыгодном свете, нелюбезный, неудобно, душа-повреждения, хлопотно, или уродливый, то он должен быть либо улучшение, избавилась от, или заменить. (Лучшие философские и политические системы являются те, которые подходят на карточке). Таким образом, реставрация, акт возвращения, процесс восстановления, попытка освоения, окупаемости, восстановление, выкуп, изъятие, спасение, поиск, спасение, как правило, благородное дело, за исключением, и в очередной раз достаточно-парадоксально восстановления дворянства, класса лиц, отличающихся высокой рождением или ранга. (Никто не хотел, да? Или, может быть? Современный олимпийский импульс*

*и программа утверждает, да, да, да!)*

Artwork, furniture, and our teeth are often in need of restoration, as are classic cars and damaged forests. But what about the world of audio, what needs restoring here? Vintage tube amplifiers and tuners immediately come to mind, as do fine loudspeaker cabinets and turntables. Besides audio equipment, there is the music itself.

*Произведение, мебель, и наши зубы часто нуждаются в реставрации, равно как и классические автомобили и поврежденные леса. Но как насчет мира аудио, ЧТО НУЖНО восстановления здесь? Усилители классическим ламповым и тюнеры сразу же приходят на ум, как это делают мелкие корпуса громкоговорителей и вертушки. Кроме того, звукового оборудования, есть сама музыка.*

In the early days of radio, all broadcasted music was live, as the recording equipment of the day could not compete with sonic glory of live performances. But once audio recordings caught up with live feeds, live music became rare on the radio, as it could not compete with the convenience offered by tape and LPs. In addition, recordings of stellar performances and great artists allowed the timeless to live on and escape the confines of the present. Recorded music, indeed much like music itself, is one of mankind's greatest accomplishments.

*В первые дни радио, все транслировать музыка была живой, как записывающее оборудование дня не могли конкурировать с звуковым славы живых выступлений. Но однажды аудиозаписей догнал живых кормов, живая музыка стала редко на радио, так как он не может конкурировать с удобством, предлагаемых ленты и пластинок. Кроме того, записи звездных спектаклей и великих художников разрешено вне времени, чтобы жить и бежать за пределы настоящего. Музыка, на самом деле так же, как и сама музыка, является одним из величайших достижений человечества.*

So what sort of restoration is possible or necessary with recorded music? Great historical recordings are often carefully restored by painstaking adjustments and edits to the master recording. Much like bad plastic surgery, however, sometimes the restoration is worse than the original. But more often, the restoration pleases greatly. (I have found Philips refurbished historical recordings particularly fine.) Unfortunately, such sonic restoring is beyond the average music lover's talent, time, or endurance. What I am about to recommend is something simpler and easier to implement.

*Так какие реставрации возможно или необходимо с записанной музыки? Великие исторические записи часто тщательно восстановлен кропотливой корректировок и исправлений на мастер-записи. Так же, как плохой пластической хирургии, однако, иногда восстановление хуже, чем оригинал. Но чаще всего, восстановление сильно радует. (Я нашел Philips отремонтированы исторические записи, особенно мелкие). К сожалению, такие звуковой процесс восстановления выше среднего любителей музыки талант, время, или выносливость. То, что я порекомендовать что-то проще и легче реализовать.*

But first, here is a quick aside, paradoxically enough (it just one paradox after another today) historians have little problem reading very old newspapers, as they were printed on cotton-based paper (up until the 1890s), which can survive centuries of existence, while still remaining supple and white. But once wood-based paper replaced the finer cotton-rag paper, things changed. Starting in the 1930s, many a historian discovered that a critical newspaper, but not a particularly old one, had begun to return to the sawdust from which it was made. Well, perhaps, we music lovers are in a similar bind.

*Но во-первых, здесь быстро в сторону, как это ни парадоксально (это как раз один парадокс после очередного сегодня) историки небольшая проблема чтения очень старые газеты, так как они были напечатаны на бумаге хлопка на основе (вплоть до 1890-х годов), которые могут выжить веков существование, оставаясь упругой и белый. Но как только на основе древесины бумага заменить на более тонкий хлопок тряпка бумаги, вещи изменились. Начиная с 1930-х годов, многие историк обнаружил, что критическая газета, но не особенно старый, начали возвращаться к опилок, из которого она была сделана. Ну, может быть, мы любители музыки в аналогичном привязки.*

Not all master tapes survive in pristine shape, as not all tape-coating formulations are equally time resistant. In fact, many master tapes from the 1950s are in better shape than some from the 1960s. In addition, magnetic tape will self-erase, given enough time. Entropy is a steady and tireless worker. With the advent of the perfect sound forever, i.e. the CD and digital recordings, a new problem arose: perfectly limited musical information forever.

*Не все мастер-ленты выжить в первозданном виде, так как не все ленточные покрытия препараты одинаково раз устойчивостью. В самом деле, многие мастер-ленты из 1950-х годов в лучшей форме, чем некоторые из 1960-х. Кроме того, магнитная лента будет самостоятельно стирать, при наличии достаточного времени. Энтропия является устойчивым и неутомимый труженик. С появлением совершенного звука навсегда, то есть компакт-диск и цифровая запись, возникла новая проблема: совершенно ограниченный музыкальную информацию навсегда.*

A digital recording's sampling rate sets a strict high-frequency limit that is quite unlike the limited high-frequency bandwidth of analog recordings, which gently fall off at high frequencies, unlike the digital cliff edge, after which high-frequency recording abruptly stops; period. Is the digital truncation of high frequencies a big deal? We are after all men and not bats, so cares if the recording's high-frequency response is severely and brutally shaved off? Well, it is always worth remembering that in nature there are no brick-wall filters.

*Частота дискретизации цифровой записи устанавливает строгое ограничение высоких частот, совсем не похоже на ограниченной пропускной способности высокочастотного аналоговых записей, которые мягко спадают на высоких частотах, в отличие от цифрового краю обрыва, после чего высокочастотный записи резко останавливается; Период. Есть цифровой усечение высоких частотах большое дело? Мы ведь люди, а не летучие мыши, так заботится, если высокие частоты записи является строго и жестоко сбрил? Ну, это всегда стоит помнить, что в природе не существует кирпича стены фильтры.*

My guess is that if the CD's high-frequency response had extended out to 30kHz, few would mind. Why? I remember reading of a simple but powerful experiment performed in England back about fifty years ago, wherein a high-quality recording that extended out to 40kHz was passed through an adjustable low-pass filter. The result was that, for listeners not to notice the filter's presence, the high-frequency -3dB down frequency had to be over 27kHz or so, something a CD's 44.1 kHz sampling rate cannot allow, as it imposes a strict limit of 22kHz. As the Wiki puts it:

*Я думаю, что если высокочастотный ответ КР были вытянуты в 30 кГц, мало кто будет возражать. Почему? Я помню, как читал простой, но мощный эксперимента, проводимого в Англии назад около пятидесяти лет назад, в котором качественная запись, что вытянуты в 40 кГц был принят через регулируемый фильтр нижних частот. Результат был, что для слушателей не заметить присутствие фильтра, ВЧ--3 дБ вниз частоты должно было закончиться 27kHz или так, то частота дискретизации 44,1 кГц CD не может позволить, так как это накладывает строгое ограничение на 22 кГц. Как Wiki пишет:*

The [Nyquist–Shannon sampling theorem](#) states that perfect reconstruction of a signal is possible when the sampling frequency is greater than twice the maximum frequency of the signal being sampled, or equivalently, when the [Nyquist frequency](#) (half the sample rate) exceeds the highest frequency of the signal being sampled. If lower sampling rates are used, the original signal's information may not be completely recoverable from the sampled signal. [2] For example, if a signal has an upper [band limit](#) of 100 Hz, a sampling frequency greater than 200 Hz will avoid [aliasing](#) and would theoretically allow perfect reconstruction.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling\\_rate](http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling_rate)

*Теорема Котельникова гласит, что идеально подходит реконструкция сигнала можно, когда частота дискретизации больше чем в два раза максимальная частота сигнала, пробы, или, что эквивалентно, когда частота Найквиста (половина частоты дискретизации) превышает самую высокую частоту сигнала в выборку. Если нижние частоты дискретизации используются, информация исходного сигнала не может*

быть полностью взысканы с оцифрованного сигнала. [2] Например, если сигнал имеет верхний предел диапазона 100 Гц, частота дискретизации выше, чем 200 Гц будет избежать наложения и теоретически позволяют идеальной реконструкции.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling\\_rate](http://en.wikipedia.org/wiki/Sampling_rate)

I remember a vivid sonic demonstration that [John Atwood](#) made for me at his home. First, John played a fine LP on his equally fine turntable. This was the absolute sound, as this was *the signal source*. The LP's actual recorded performance was not in the least important, as the sonic buck stopped at the LP playback. The LP might have held ticks and pops and a little wrap, or it might have received heavy sonic manipulation at the hands of an overzealous recording engineer, but the signal out of the phono stage was the target and the digital recordings made of this signal had to hit this target. How close did they come? I was quite impressed, as the high-resolution digital recordings came close to the LP's (absolute) sound; I would say that it was about 95% on the mark. At one point, John asked if I would like to hear a standard CD-quality recording of the LP. I was keen to do so, as I wondered if I would hear a substantial difference.

*Я помню яркий звуковой демонстрация того, что Джон Этвуд сделал для меня в своем доме. В-первых, Джон играл прекрасный LP на его не менее тонкой вертушки. Это было абсолютное звук, как это было источником сигнала. Фактическое записанное исполнение ЛП не был в наименее важным, так как звуковая доллар остановился на воспроизведении LP.LP, возможно, состоит из щелчков и треск и немного обертку, или это, возможно, получил тяжелое звуковой манипуляции в руках переусердствовать звукорежиссера, но сигнал из фонокорректор было целью и цифровые записи, сделанные из этого сигнала был ударить этой цели. Как близко они пришли? Я был очень впечатлен, так как цифровые записи с высоким разрешением приблизились к (абсолютной) звучание ЛП; Я бы сказал, что это было около 95% от марки. В какой-то момент, Джон спросил, если я хотел бы услышать стандартный запись CD-качества ЛП. Я стремился сделать так, как я подумал, если я услышу существенную разницу.*

Bleak and grim was the result, amazingly so. Gone were the shimmer and luster; even the ticks and pops sounded flat and distant. "Bereft of life" was how I described the sound. I realized instantly what a bad trade we had made by accepting lifeless sound in exchange for losing the LP's pops and ticks and inconvenience.

*Холодный и мрачный был результат, удивительно так. Прошли мерцание и блеск; даже щелчков и треск прозвучал квартиру и далеким. "Лишенный жизни" было, как я описал звук. Я сразу понял, что плохая торговля мы сделали, приняв безжизненное звук в обмен на потери треск и щелчков ЛП-х и неудобства.*

Although to be frank, it wasn't as if we had swapped the finest vellum or parchment paper for coarse, splinter-filled wood-pulp paper, as the most LPs made in the in the 1970s were poorly and cheaply made, so the thick, flat, high-quality LPs of the 1950s were a distant memory. (Speaking of splinters, I remember buying LPs back in the 1970s that held vestiges of recycled LP's label floating in the black vinyl and almost all LPs held a fat thumb indent due to being pulled from the record press too soon, before the LP had completely hardened.) Thus, the CD fought an easy fight against a tired and injured opponent.

*Хотя, откровенно говоря, было не так, если мы поменялись лучшие веленевую или пергаментную бумагу для грубой, отколовшейся заполненные бумаги древесно-волокнутой массы, как большинство пластинок сделаны в в 1970-х были плохо и дешево сделаны, так что толстый, плоские, высококачественные пластинки 1950-х годов были далеким воспоминанием. (Говоря о осколков, я помню, как покупал пластинки еще в 1970-х годах, проведенных остатки переработанного этикетке ЛП, плавающие в черном виниле и почти все пластинки состоялся жира пальца отступ в связи с тянут с рекордным прессе слишком рано, прежде, чем LP полностью закаленные). Таким образом, CD боролись легкий бой против уставшего и ранены противника.*



Now here is the problem: many of us own hundreds, if not thousands of CDs, which we are not willing (or unable) to replace with high-resolution downloads. What can we do? One thought that comes to mind is a harmonic restoring circuit that would add some of the missing ultra-sonic information to CD playback. Such a circuit would purposely add harmonic distortion. For example, the second harmonic of 12kHz is 24kHz. Why do I think that such a setup would work, rather than just muddy the sonic presentation?

*Теперь вот проблема: многие из нас собственное сотни, если не тысячи компакт-дисков, которые мы не готовы (или не может) заменить загрузки с высоким разрешением. Что мы можем сделать? Одна мысль, что приходит на ум, это гармоническое восстановление схема, которая бы добавить некоторые недостающие ультра-звуковой информации воспроизведения компакт-диска. Такая схема нарочно добавит гармонических искажений. Например, вторая гармоника 12 кГц 24 кГц. Почему я думаю, что такая установка будет работать, а не просто грязной звуковой презентации?*



vs



The answer is that I have repeatedly experienced the odd situation wherein an LP sounded much better than the CD, although both were based not on an analog master tape, but on the same digital recording! Surely, the CD should have easily won this shootout, but it didn't. Why not? My best guess is that the LP, because it, like the phono cartridge and tonearm and turntable, is a mechanical device, being subject to vibrations and the resulting resonances, resonances which helped restore some of the missing harmonics lost in the original highs-truncated digital recording, thus reestablishing a more natural tonal balance.

*Ответ в том, что я неоднократно испытывал странную ситуацию, где LP звучал гораздо лучше, чем компакт-диск, хотя и были основаны не на аналоговом мастер ленте, но в тот же цифровой записи! Конечно, компакт-диск должен быть легко выиграл этот перестрелки, но это не так. Почему нет? Моя догадка, что LP, потому что он, как звукоснимателя и тонарма и поворотный круг, это механическое устройство, подвергаясь воздействию вибрации и полученных резонансов, резонансы, которые помогли восстановить часть пропавших без вести гармоник, потерянных в оригинальных максимумов при отсечении цифровой записи, таким образом, восстанавливая более естественный тональный баланс.*



The hope is that the above sonic image could be transformed into the following image. (Some might argue that both pictures are flawed, as the first is washed out, while the second is over saturated. Possibly, but I know which I prefer.)

*Есть надежда, что выше звуковой образ может быть преобразована в следующем изображении. (Кто-то может возразить, что обе картины имеют недостатки, как первый вымывается, в то время как второй перенасыщен. Возможно, но я знаю, который я предпочитаю.)*



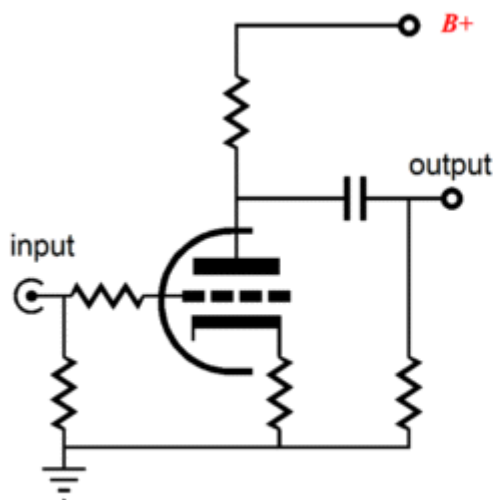
What we need is a tube-based circuit that offers a fair amount of harmonic distortion and no voltage gain and, preferably, no phase inversion. In addition, it should add no hum or other sonic blight. A simple

grounded-cathode amplifier might immediately come to mind, but such a circuit will invert the phase and produce voltage gain and present a relatively high output impedance; more importantly, it may not produce enough harmonic distortion. How much harmonic distortion is enough? My design goal was 1%, which I chose quite arbitrarily; perhaps much more is needed.

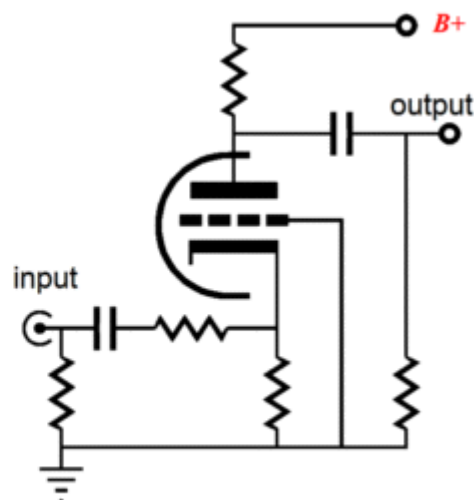
*Что нам нужно, это схема лампы, который предлагает достаточное количество гармонических искажений и не усиления напряжения и, желательно, не инверсии фазы. Кроме того, он должен добавить не гул или другой звуковой упадок. Просто усилитель с заземленным катодом может сразу приходят на ум, но такая схема будет инвертировать фазу и производить усиление по напряжению и представить относительно высокий выходной импеданс; что еще более важно, он не может производить достаточное количество гармонических искажений. Сколько гармонических искажений достаточно? Моя цель дизайна была 1%, что я выбрал совершенно произвольно; возможно, требуется гораздо больше.*

### Designing A Harmonic Restorer

The next tube circuit that will come to mind is the cathode follower, as it neither inverts the input signal's phase nor produces any voltage gain. But the problem with a cathode follower is that due to the large amount of degenerative negative feedback it intrinsically employs in its operation, it doesn't add much harmonic distortion. We can certainly get more distortion by loading down its cathode with a too small-valued cathode resistor, but then we will engender a big gain insertion loss. The next non-phase-inverting tube circuit that comes to mind is the cathode-coupled amplifier. Yes, it doesn't invert the phase, but it presents many of the same problems that the grounded-cathode amplifier did: too little distortion and a high output impedance. Moreover, it would most likely require a negative power supply rail, which many tube-loving DIYers recoil from. So what's left? The grounded-grid amplifier does not invert the phase, but it provides even more gain than the grounded-cathode amplifier.



**Grounded-Cathode Amplifier**



**Grounded-Grid Amplifier**

One huge advantage the grounded-grid amplifier offers is that the grid, which is usually grounded, can be used as an inverting input. This added inverting input allows us to use an Aikido noise-reduction technique to vastly improve its PSRR. And the usual disadvantage the grounded-grid amplifier, its low input impedance, is not a problem in this application, as the CD or DAC's output will directly couple to the input and not pass through any volume potentiometer. We still face the problems of voltage gain, a high  $Z_o$ , and not enough distortion, but there is a workaround.

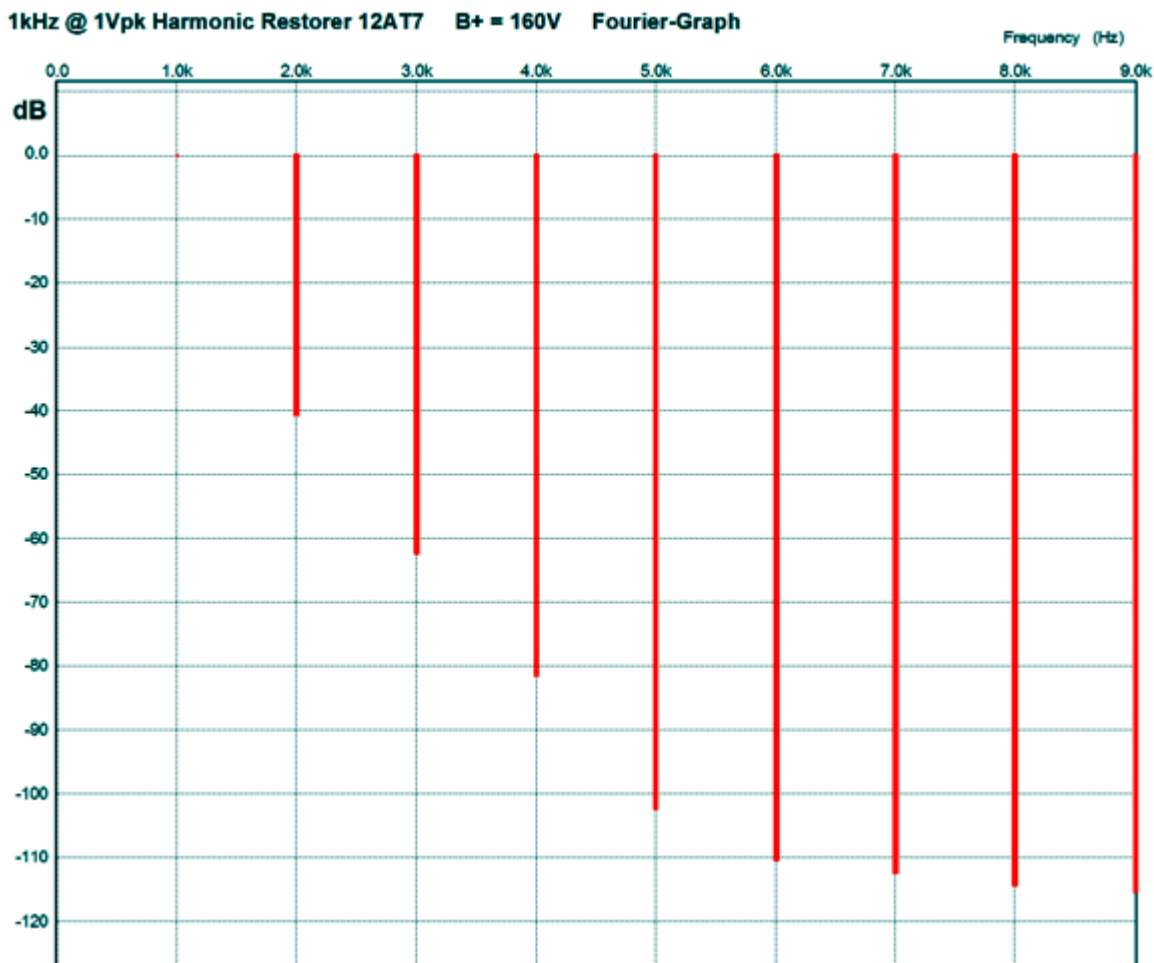
We can burn off excess gain with simple two-resistor voltage divider. We can produce higher distortion by letting the grounded-cathode amplifier swing large plate swings. We can greatly enhance the circuit's PSRR by using a two-resistor voltage divider to feed the grid a sampling of the power-supply noise, which will null the power-supply noise at the plate (the circuit's output).





DC converter that would run off an external 12Vdc power supply, which would heat the heaters. In other words, I imagined housing the Harmonic Restorer circuit in a cute little extruded project box, with a wallwart providing the needed juice. Of course, a much fancier power supply could be used.

In SPICE simulations, the above circuit worked quite well, as the following Fourier graph shows. The second harmonic comes in at 1%, which might prove too clean to restore the CD's sonic luster. I remember reading how it took over 5% of second harmonic distortion for most listeners to notice its presence. Nonetheless, the remaining harmonics fall off in a beautifully single-ended fashion.

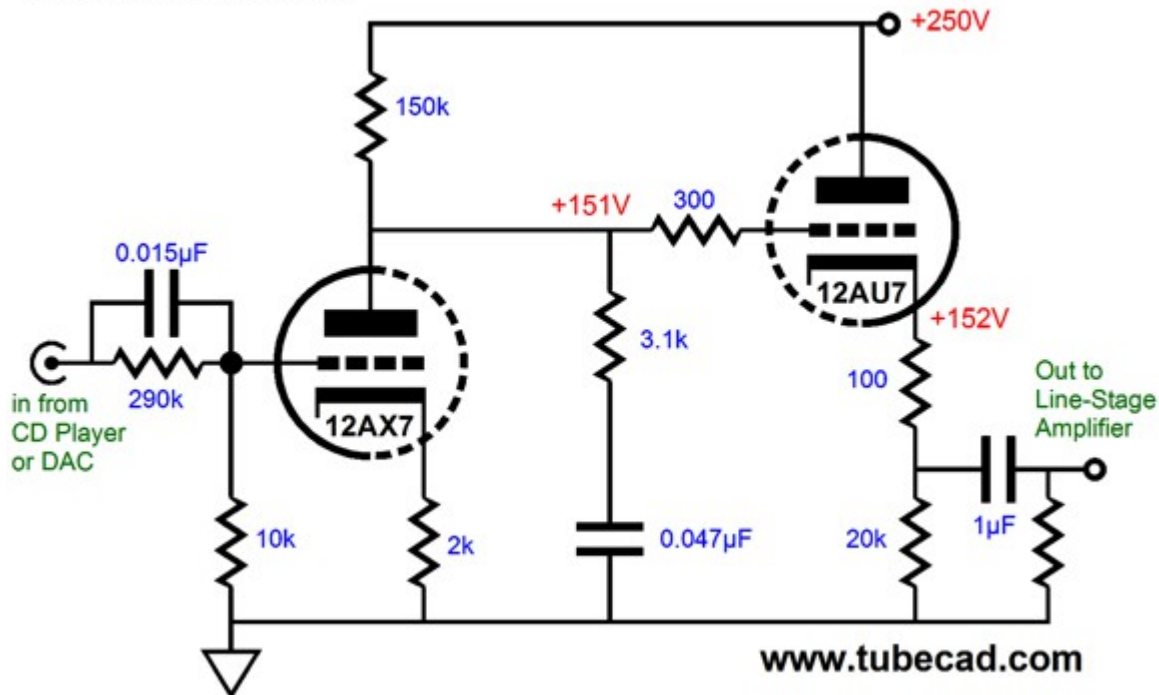


### Frequency-Selective Harmonic Restoration

So, are we done? Of course not. The whole point of this post was not to proclaim a new firmly established path to audio nirvana, but to describe a somewhat elaborate thought experiment. For most, as I have discovered over the last 15 years, believe quite earnestly that **NO NEW TUBE CIRCUIT IS POSSIBLE**. As they see it, all that could be done with tubes has been done in the first half of the last century; all that is possible today is a more studied and conspicuous selection of expensive parts; and should someone be so bold as to create a new tube circuit, he is either a fool or a fraud. As this modern man sees it, the rounded corners on an iPad was a major technological advancement, certainly worthy of a patent and adulation. Reality is very much different.

Given an extra ten minutes, I can come up with an additional ten variations on the Harmonic Restorer circuit. For example, how about adding some negative or positive crossfeed, which would narrow or widen the sound stage? Or how about two potentiometers, one at the input and one in the middle, so an adjustable amount of harmonic distortion could be added? Or we could place a frequency-selective shelving network in front of the Harmonic Restorer circuit and a counter shelving network in the middle of the circuit. Why? This approach would produce very little distortion at frequencies below the shelving frequency and more distortion above it. A frequency selective Harmonic Restorer, in other words. The following is one possible implementation.

## Harmonic Restorer



The tube used is a 12DW7, which is a dissimilar tube that holds a 12AX7 triode and a 12AU7 triode. The input shelving network freely passes the high frequencies, but greatly attenuates the lower frequencies, as the 290k and 10k resistors define a severe two-resistor voltage divider. The input triode's output impedance at its plate is in series with the second shelving network made up of the 3.1k resistor and 47nF capacitor. This second shelving network will undo the first network's frequency skewing. So, the highs end up getting amplified and then attenuated, causing the high frequencies to hold more harmonic distortion. What is missing is a PSRR-enhancing technique and the protection diode for the cathode follower