

Part 1

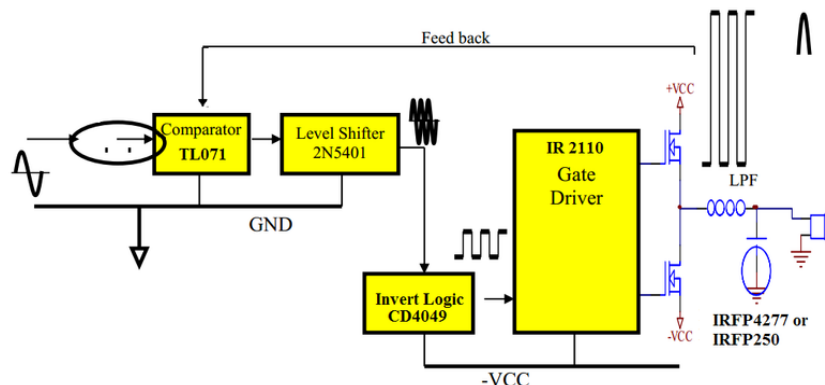
IRS-900D Class-D Amplifier Tutorial

Oleh: kartino@yahoo.com

Konsep Class-D Amplifier

Dalam satu dekade terakhir, dalam dunia audio power amplifier telah tersedia produk komersial untuk audio amplifier jenis baru yaitu Amplifier Class-D. Berbeda dengan Class-A, B, AB, dimana sinyal masuk langsung dikuatkan dalam bentuk sinyal suara asli, dalam Amplifier Class-D, dilakukan pencacahan sinyal suara yang masuk namun masih tetap dalam metode analog, lalu sinyal dikuatkan. Pada tingkat akhir amplifier, sinyal tercacah tersebut dikembalikan menjadi sinyal suara dengan menggunakan induktor-kapasitor (L-C) filter.

Konsep Class-D yang akan dibahas disini menyesuaikan dengan skema yang akan kita ambil sebagai contoh design berikutnya, adalah desain Class-D dengan blok diagram adalah sebagai berikut:



Gambar.1 – Blok Diagram Class-D

Secara singkat, self oscillating Class-D bekerja dengan internal loop feedback, dimana **feedback** loop terdapat rangkaian R-C yang akan membuat rangkaian berosilasi sendiri, menjadi generator sinyal gergaji. Sinyal gergaji ini akan dibandingkan dengan sinyal masukan audio oleh **Comparator** IC TL071.

Sinyal keluaran dari Comparator IC berupa sinyal audio yang sudah dicacah oleh sinyal gergaji, sehingga menjadi sinyal slope dengan komposisi waktu ON-OFF menyesuaikan dengan level sinusoidal dari sinyal masukan. Tegangan sinyal slope ini referensinya ke ground (GND) dan karakteristiknya masih belum memenuhi kriteria masukan menuju gate driver IC. Sementara gate driver IC menggunakan referensi tegangan ke $-VCC$. Jadi untuk itu diperlukan **level shifter** berupa PNP transistor 2N5401 dan **Invert logic IC** CD4049.

Sementara gate driver juga membutuhkan dua sinyal input yaitu high-gate dan low-gate. Comparator IC yang memiliki satu keluaran, oleh **Invert logic IC** digandakan menjadi dua keluaran, dimana satunya adalah inverting hingga dihasilkanlah low-gate and high-gate output yang sesuai untuk masukan gate driver IC. Gate driver IC siap menggerakkan kedua sisi high dan low mosfet power secara bergantian.

Output dari power mosfet yang secara ON-OFF identik dengan output Comparator. Dan sudah dijelaskan sebelumnya output comparator sendiri menyesuaikan dengan input sinusoidal audio. Jadi dari comparator menuju mosfet ini di atas kertas tidak akan terjadi distorsi. Tidak ada efek-efek khusus yang perlu diperhatikan yang bisa menyebabkan cacatnya suara yang diakibatkan oleh amplifikasi sinyal. Sementara Comparator, Level shifter, Logic IC, dan gate driver IC bekerja pada tegangan 12 Volt, tegangan mosfet bisa sangat variatif dan sangat lebar, bebas di tegangan SOA mosfet. Pada akhirnya, batas tegangan final ini menjadi batas clipping sebuah ampli Class-D.

Output final mosfet ini agar kembali menjadi sinyal suara maka dilakukan dengan Low Pass Filter (LPF). Dengan komposisi besar induktor dan kapasitor yang tepat maka sinyal slope tercacah tadi bisa di konversi kembali menjadi sinusoidal. Memang tidak sempurna layaknya sinusoidal pada Class-A maupun Class-AB. Akan tetapi harus diingat bahwa speaker adalah peralatan mekanika dinamis. Efek-efek fisika mekanika dari speaker seperti pegas dan kelembaman massa daun speaker sendiri justru membantu penyempurnaan output suara sehingga cacat yaitu ripple sisa filterisasi frekuensi pencacahan menjadi tidak berarti.

Beberapa contoh berikut adalah iron powder core yang bisa dipakai untuk merakit class D.



T-157, Kool Mu, 40 - 50 lilit



T157 Amidon, 45 - 55 lilit



T157 Micrometal, 45 - 55 lilit



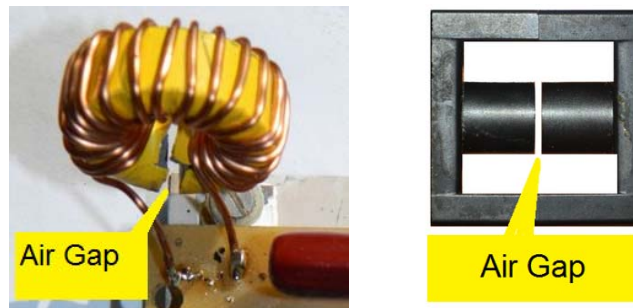
MS157 Arnold, 24 - 28 lilit



MS130 Arnold, 16 - 22 lilit

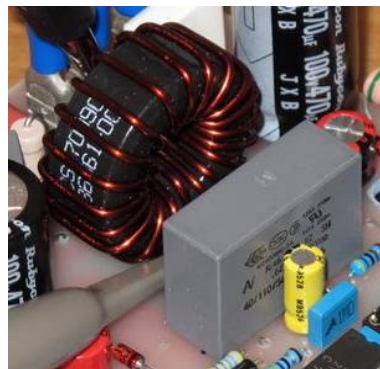
Alternatifnya adalah ferrite core yang bisa didapat dari inti PSU atau filter. Filter output PSU juga bisa digunakan. Jenis ferrite core harus dibuat air gap untuk menaikkan kemampuan magnetik, yaitu dengan jalan memutus lingkaran toroid dengan gergaji besi atau memotong inti untuk EI Core. Karena tidak ada data pabrikan maka untuk menentukan jumlah lilitan yang optimal hanya bisa dilakukan dengan coba-coba. Jumlah lilitan dengan inti ferrite air gap harus dicoba dari yang tertinggi ke terendah antara 14-22 kali dengan kawat diameter 1-1.5mm.

Fungsi air gap adalah meningkatkan kapasitas magnetik dari inti untuk menaikkan nilai saturasi. Bila tidak cukup besar nilai saturasi dari inti besi maka koil induktor beserta inti akan menjadi sangat panas pada beban tinggi. Namun dengan adanya air gap ini juga membuka peluang kebocoran elektromagnetik (EMI) yang mungkin keluar ke jaringan. Gambar dibawah adalah contoh material yang bisa digunakan:



Gambar.3 – Alternatif Inductor

Untuk kapasitor karena bekerja pada frekuensi tinggi maka dipilih jenis non polar dengan kemampuan charge-discharge yang tinggi dan juga tegangan kerja yang cukup tinggi. Kapasitansnya berkisar 470n – 1 μ F 600V non polar.

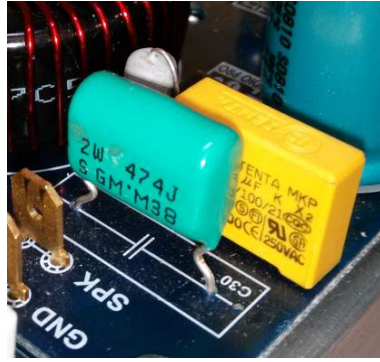


Gambar.4 - Output Capacitor dan Inductor

Jenis kapasitor yang direkomendasikan adalah polyester atau polypropylene seperti LLC grade capacitor atau MKP.



WIMA MKP Capacitor



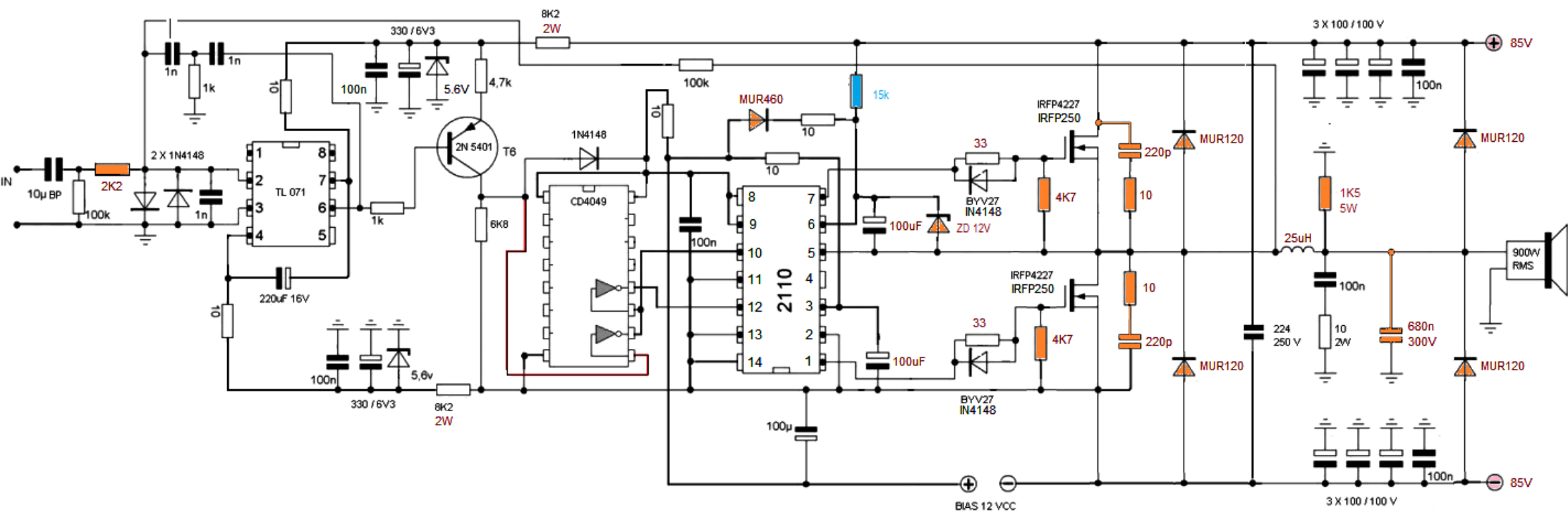
Polyester based capacitor untuk LLC resonant (biru)

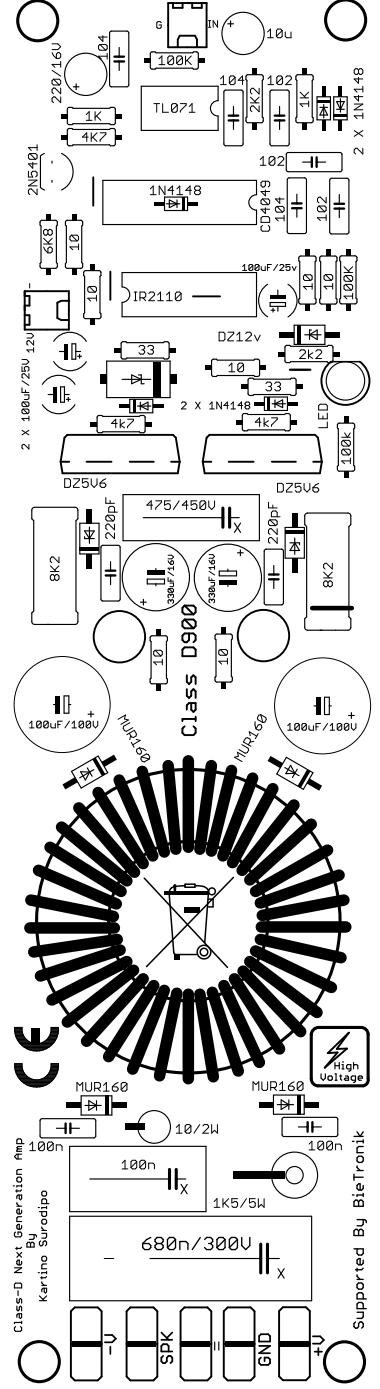
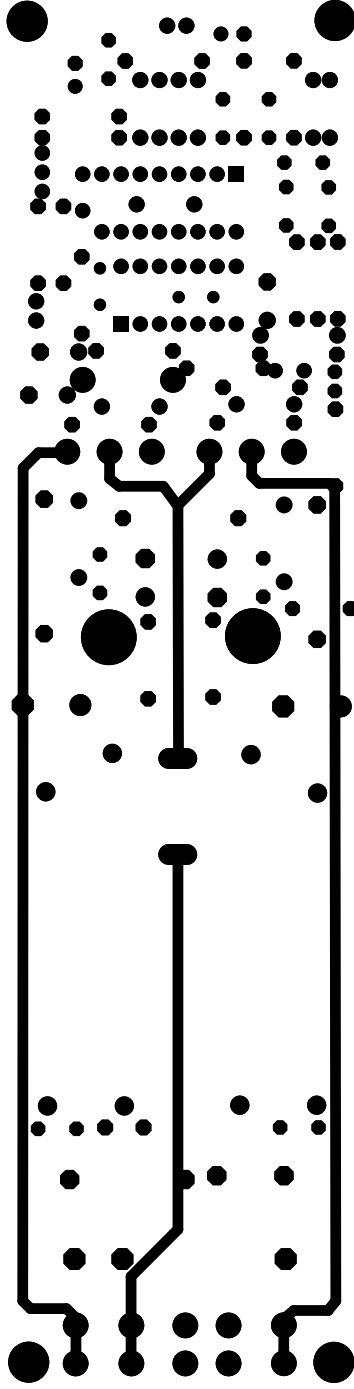
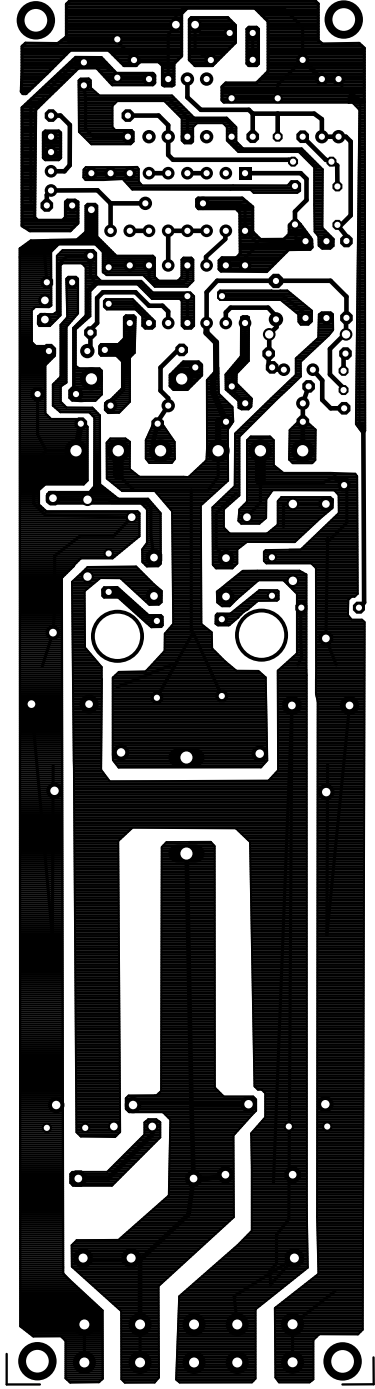


MEX-X2 MKP capacitor

Lampiran

**Skematik
PCB Layout
Komponen Layout**





Part 2

Class D Frequently Asked

Class D amplifier gagal bekerja?

Kebanyakan kegagalan dalam merakit sebuah amplifier class D dikarenakan pemilihan part dibawah standard kualitas. Umumnya, disebabkan oleh penggantian komponen yang tidak sesuai dengan skema aslinya. Komponen amplifier harus sesuai dengan frekuensi kerja tegangan yang cukup tinggi. Tidak sembarang part bisa digunakan sebagai pengganti. Komponen kunci adalah part aktif dan design LPF Filter.

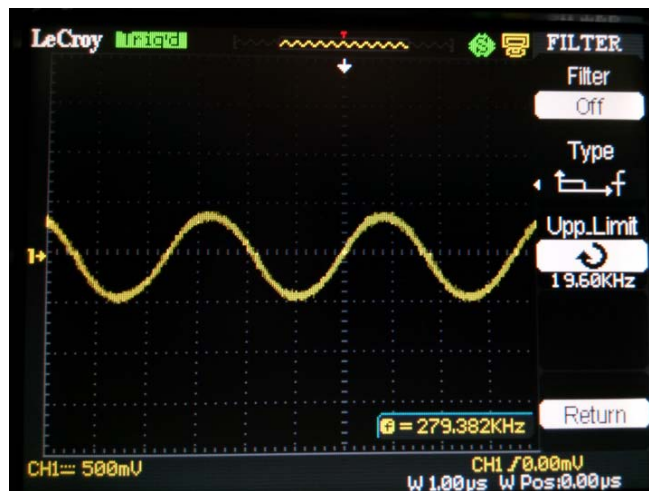
Kegagalan bisa juga karena perancangan layout yang tidak sesuai dengan kaidah perancangan untuk switching pada frekuensi tinggi. Layout yang baik harus setipis mungkin untuk sinyal lemah, jarak cukup untuk beda tegangan dan arah arus, sinyal arus lemah dan arus kuat harus dijauhkan agar arus besar tidak menginduksi sinyal lemah. Jalur sinyal lemah berfrekuensi tinggi harus sependek dan serendah mungkin dari PCB ground plane. Ground plane tidak boleh membentuk close loop.

LPF Design?

Design LPF, menentukan jenis induktor, jenis core, jumlah lilitan dan besar kapasitor lihat Part 3.

Class D bersuara serak dan kasar, treble terlalu tajam?

Suara serak dan kasar biasanya dikarenakan adanya cut off LPF yang terlalu tinggi sehingga menyebabkan sisa frekuensi PWM terbawa ke speaker. Umumnya disertai keluhan induktor yang panas. Solusinya ditambah jumlah lilitan. Kalau dicek dengan osiloskop, residu PWM diusahakan kurang dari 2Vpp dalam keadaan speaker terpasang (Gambar-1). Tetapi penambahan lilitan juga menurunkan kecepatan PWM.



Gambar-1 Vout menunjukkan residu PWM, diukur di output terminal dalam keadaan speaker terpasang

Jumlah lilitan secara singkat agar induktansi dihasilkan sekitar 22uH s.d. 30uH atau lebih tergantung kecepatan switching PWM. Makin cepat makin kecil induktansi dan sebaliknya. Tentu cut off akan makin tinggi tapi itu bagus. Tujuan sebenarnya adalah membuat sinyal output rendah ripple frekuensi PWM. Makin cepat makin rapat PWM makin mudah membuatnya halus bebas ripple.

Suara kasar bisa juga disebabkan oleh kapasitor LPF yang terlalu kecil, kering atau mati.

Mosfet panas?

Mosfet panas bisa disebabkan oleh kurangnya dead time sehingga terjadi cross-conduction yang cukup menyebabkan arus langsung mengalir melewati mosfet high side dan low side. Solusinya dengan menaikkan tahanan pada gate, yang berkisar 22 sampai 47 ohm. Untuk mosfet ringan semacam IRFP4227 R gate bisa dipilih sampai 66 ohm. Makin besar Qg mosfet makin kecil R gate dan sebaliknya.

Mosfet panas bisa juga disebabkan oleh terlalu banyaknya lilitan sehingga mosfet menjadi lebih susah ON dan OFF karena adanya induksi lawanan dari induktor akibat storage energy tersimpan terlalu besar.

Brek-brekkk saat clip?

Brek brekkk saat clip adalah normal, dan menjadi ciri khas class D. Brekk brekk terjadi saat clip, PWM berhenti sesaat, dan menyebabkan speaker seperti terkena arus DC.

Brek-brekkk sebelum clip?

Brek brekkk sebelum clip dikarenakan supply bias terlalu lemah, bisa karena tegangan bias kurang, dioda bootstrap kurang memenuhi syarat, kurng cepat atau kurang besar. Dioda bootstrap harus minimal 3A dengan reverse recovery time (T_{rr}) lebih kurang 30ns.

Suara treble kurang jernih seperti terpotong?

Suara treble tereduksi dikarenakan cut off LPF yang terlalu rendah. Kedua disebabkan kecepatan PWM yang kurang. Untuk menaikkan kecepatan switch PWM, rangkaian harus lincah dan ringan. Untuk itu harus didukung komponen yang memiliki miller effect yang rendah, misal pemakaian mosfet dengan Q_g kurang dari 70nC, dan cukup satu set mosfet misal IRFP4227 tanpa totem. Untuk menghasilkan suara treble yang bagus diperlukan kecepatan switch di atas 300kHz. Agar lebih cepat bisa dipadukan dengan core iron powder seperti T157 merah dari Micrometal.

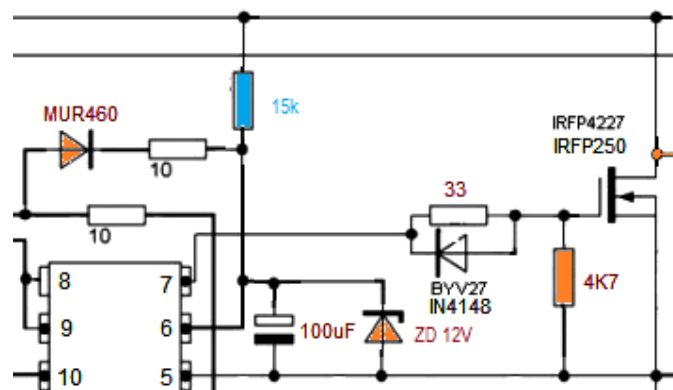
Suara pada saat awal dinyalakan bagus, beberapa saat kemudian buruk?

Masalah ini disebabkan oleh pemakaian core yang saturasi karena terlalu kekecilan atau core losses terlalu tinggi sehingga panas. Saat core panas nilai AL turun dan menyebabkan induktansi (μH) juga turun. Solusinya pilih core yang cukup besar dan tidak mudah saturasi seperti warna biru dari produk Arnold atau warna merah dari Micrometal. Lakukan pengetesan di lapangan. Bila saat full load core panas hingga tidak kuat dipegang berarti kurang besar dan saturasi.

Saturasi adalah dimana kondisi nilai pemagnetan cari core sudah tidak mau naik lagi karena jenuh akibat arus yang mengalir cukup tinggi.

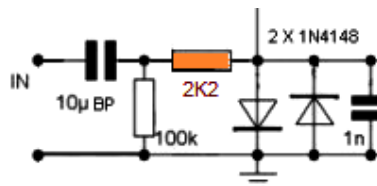
Ampli susah start?

Ampli susah biasanya mudah bila dipancing dengan input sinyal masuk. Atau dengan mengisi bootstrap dengan menambahkan R 15K dari plus ke bootstrap high dan Zener 12V dari bootstrap ke jalur prefilter.



Terdengar noise saat volume ditutup (nol)?

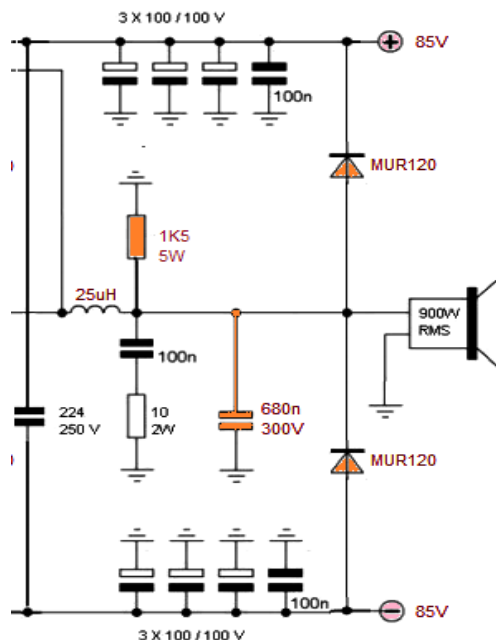
Ampli nyicit atau timbul noise saat volume ditutup hingga nol disebabkan terganggunya frekuensi PWM dikarenakan posisi potensio menyebabkan loop feedback terganggu. Untuk mengatasinya R input dibesarkan sehingga ada nilai minimum saat volume ditutup naik dan frekuensi tinggi triangle pada input tidak terby-pass ke ground lewat potensio.



Ampli keluar asap pada bagian belakang resistor dari output ke ground?

Ini umumnya terjadi akibat resonansi yang timbul saat output tidak dikoneksi ke speaker saat ampli dinyalakan. Karena tidak ada speaker, terjadi kesetimbangan (resonansi) L dan C dari LPF sehingga terjadi efisiensi sangat tinggi, sehingga energi yang masuk ke LPF seperti tertampung makin naik menyebabkan output bertegangan sangat tinggi sehingga membakar tahanan tadi.

Cara mengatasinya adalah dengan memasang anti resonan resistor dengan watt cukup besar, 1K5 5W dan memasang dioda ultrafast, seperti pada gambar dibawah. Saat terjadi resonansi bila tegangan output melebihi tegangan supply karena arusnya cukup kecil, oleh dioda ultrafast tersebut muatan LPF akan ditumpahkan ke elco supply sehingga tegangan maksimal dibatasi sama dengan tegangan supply. Jadi aman.

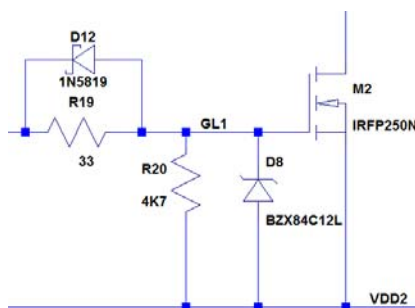


Mosfet sering mati saat ON, tanpa penyebab?

Mosfet bati mendadak saat ON, tiba-tiba saja, dan sering terjadi dikarenakan gate driver floating dan terinduksi sehingga mosfet ON dengan sendirinya dan kontinyu. Sebab kedua, tegangan Vgs melebihi ketentuan.

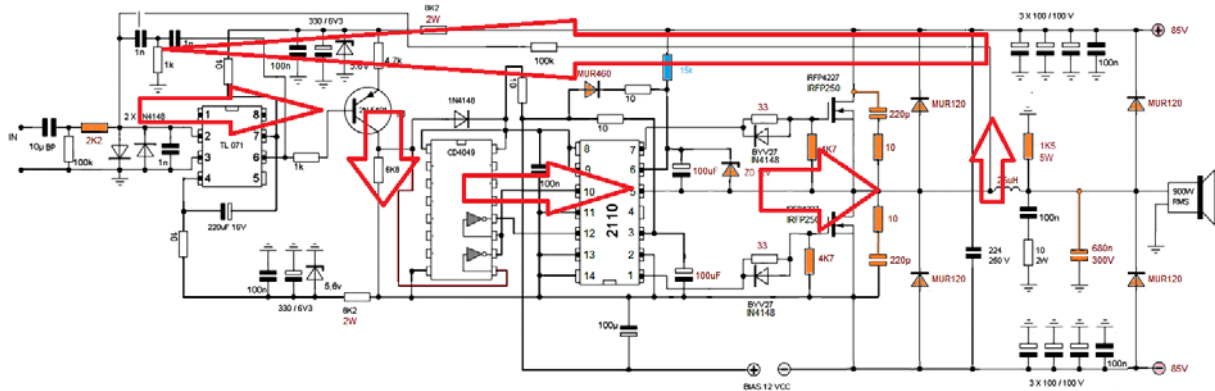
Saat mosfet mati mendadak, umumnya GDS junction lumer sehingga ketiganya akan short. Bila ini terjadi maka bisa jadi totem pole, dan mungkin gate driver IR2110 atau IR2092 ikut terbakar. Jadi harus diganti juga.

Untuk mengatasi gate driver floating, maka perlu ditambahkan tahanan 4K7 dan juga Zener 12V dari Gate ke source mosfet.



Kecepatan switching PWM rendah?

Kecepatan switching PWM ditentukan oleh besarnya miller cap dari keseluruhan feedback loop dari awal sampai akhir seperti ditunjukkan dibawah ini.



Sehingga setiap komponen mempengaruhi kecepatan. Kecepatan PWM secara signifikan dipengaruhi oleh pemilihan mosfet. Pemilihan mosfet dengan Q_g rendah seperti IRFP4227 secara signifikan menaikkan kecepatan PWM. Juga layout yang ringkas mungkin akan mendukung kecepatan PWM yang tinggi.

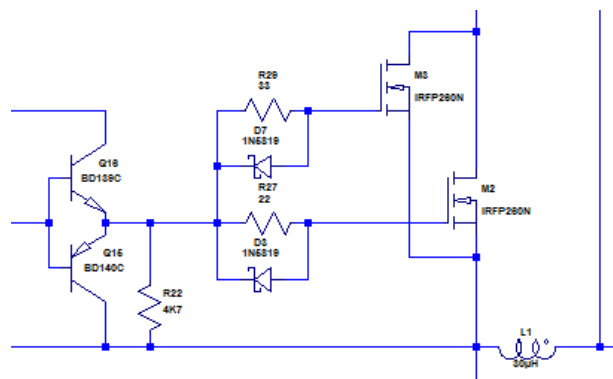
Jumlah lilitan induktor (atau tinggi rendah induktansi – uH) juga mempengaruhi kecepatan. Makin tinggi induktansi, makin rendah kecepatan PWM. Tetapi makin rendah pula ripple sisa PWM dari output, jadi seperti timbangan.

Untuk menaikkan kecepatan PWM bisa dengan memilih mosfet dengan Q_g rendah dan melakukan penyetelan ulang jumlah lilitan. Sehingga didapat kecepatan yang ideal dari sebuah ampli class D.

Mosfet apa yang tepat untuk Class D?

Mosfet yang tepat untuk class D disesuaikan dengan peruntukan amplifier. Peruntukan amplifier menentukan tingkat kecepatan switching PWM. Kecepatan switching PWM menentukan jenis mosfet yang dipakai. Makin tinggi kecepatan PWM makin rentan terhadap gangguan.

Untuk amplifier yang diaplikasikan untuk Low dan sub sampai mid, tidak butuh kecepatan tinggi. Ampli ini dapat diset pada kecepatan 200-250kHz. Mosfet dapat menggunakan IRFP260 atau IRFP250. Karena Q_g mosfet besar maka harus digunakan totem pole.



Untuk amplifier full range sebaiknya kecepatan PWM tidak kurang dari sekitar 300kHz. Agar handal pada kecepatan tersebut harus dipilih mosfet yang ringan dengan Q_g rendah seperti IRFB4227 hanya dengan 1 set tanpa totem pole.

Berapa watt keluaran Amplifier Class D?

Besar keluaran amplifier Class D adalah seperti rumus biasa hanya berbeda pada efisiensi yang bisa sampai 90%.

$$P = (V^2 / R) \times 0.9 \times 0.707 \text{ untuk half bridge}$$

$$P = (V^2 / R) \times 0.9 \times 1.414 \text{ untuk full bridge dan BTL}$$

Tetapi karena arus output harus melewati induktor dan mosfet maka kedua komponen itu menjadi pembatas dari besar output menurut perhitungan di atas di atas.

Mengapa ampli class D terdengar powerful?

Banyak pendapat di lapangan bahwa Class D terasa powerful meski secara hitungan tidak berbeda dengan ampli kelas lain. Secara spesifikasi memang benar watt sama. Tetapi perasaan lebih powerful umumnya mengacu pada kondisi dinamis (awam njedug - lincak). Untuk menghasilkan suara yang dinamis dan powerful diperlukan damping factor yang sangat tinggi. Sedangkan pengukuran watt secara umum biasanya adalah average atau peak tanpa memperhitungkan kondisi dinamis.

Damping factor sangat tinggi terjadi saat keseluruhan resistansi loop internal arus besar amplifier meliputi amplifier baik PSU maupun amplifier. Dalam amplifier damping factor sangat dipengaruhi oleh final amplifikasi daya. Pada kelas AB atau H, atau linear amplifier, fungsi final stage seperti kran dengan tahanan variable dinamis mengikuti irama musik. Jadi final stage bekerja keras seperti bendungan air yang menjaga bukaan pintu air sesuai irama musik secara linear, dengan mengatur Vce. Sedangkan sifat BJT tetap tunduk pada sifat fisika umum, dimana tentu ada kelambanan, yang umumnya kecepatan kerja dinyatakan dalam nilai slew rate. Untuk ampli besar sangat susah membuat ampli slew rate tinggi. Apakah slew rate tinggi tidak perlu pada output low? Sangat perlu, karena saat arus besar otomatis secara natural slew rate akan melambat. Praktikalnya sangat susah membuat ampli besar dengan slew rate tinggi.

Pada class D amplifier, besar daya diatur dengan waktu buka tutup dan storage energy pada coil induktor. Ini seperti bendungan dengan pintu buka tutup yang waktu buka tutupnya menyesuaikan sinyal input. Di depan bendungan ini ada dam kecil, berupa induktor dengan pintu yang selalu membuka pas dengan permintaan debit, yaitu load speaker. Sehingga berapapun permintaan debit tidak masalah karena mosfet melakukan buka tutup dengan sangat cepat. Tidak ada hambatan atau kecil yaitu Rds ON mosfet dan DC resistance dari induktor. Sangat kecil secara total. Sehingga damping factor sangat tinggi dan berkesan sangat dinamis.

Damping factor sangat tinggi bila menggunakan SMPS dan class D. Sehingga perpaduan ini sangat tinggi damping factor. Dan sangat terasa bertenaga.

Banyak yang mengira suara "njedug" secara awam dikarenakan adanya distorsi sehingga puncak yang terpotong memberi kesan "njedug". Tidak demikian, karena justru class D sangat mudah mereproduksi suara low.

Part 3

Class D Amplifier LPF Design

LPF Filter merupakan bagian sangat krusial dari class D Amplifier. Pemilihan komponen dan design harus dilakukan dengan benar karena LPF filter ini sangat menentukan bagus tidaknya suara yang dihasilkan oleh amplifier. Bagian yang penting dari design ini adalah pemilihan jenis core induktor, jumlah lilitan, besarnya secara fisik dan menentukan kapasitor. Banyak amplifier class D bersuara buruk karena gagal dalam mendesign LPF filter. Pada bagian ini, dijabarkan secara sederhana, lebih ke arah hasil praktek, tidak secara detail agar lebih mudah bagi pemula. Detail perhitungan bisa didapat dari referensi.

Jumlah lilitan induktor dan besarnya kapasitor tergantung berapa LPF mau dibuat cut off frekuensi. Tetapi dalam class D, LPF berfungsi berbeda pada crossover pasif. Selain memotong frekuensi PWM, LPF harus menjamin sinyal output cukup bersih dari sisa PWM. Makin tinggi frekuensi PWM makin mudah membuat ripple sisa PWM kecil, dan sebaliknya. Untuk melakukan setting LPF sangat dibutuhkan alat seperti LC Meter untuk membuat berapa induktansi (uH). Bila tidak ada, satu-satunya jalan dengan uji coba. Ampli dinyalakan dan sisa tegangan residu dicek dengan osiloskop. Meski ada LC Meter pengecekan residu PWM tetap diperlukan.



Gambar-1 Vout menunjukkan residu 1 Vpp PWM, diukur di output terminal dalam keadaan speaker terpasang

Perhitungan detail untuk menentukan besar uH dari induktor harus mengacu kepada website masing-masing manufaktur seperti:

http://www.micrometals.com/downloads/MicroRelease_March2010.exe
<http://www.micrometalsarnoldpowdercores.com/upload/ArnoldDesigns.exe.zip>
<http://www.mag-inc.com/design/software>

Besar induktansi tergantung kecepatan switching PWM, sebagai berikut:

PWM	Besar kapasitor
150 – 200 kHz	40 – 60uH
200 – 250 kHz	30 – 40 uH
250 – 325kHz	22 – 30 uH
325 – 400kHz	18 – 22 uH

Sedangkan besar output (Watt) menentukan besar kecil secara fisik ukuran dari induktor yang menentukan batas nilai saturasi. Makin besar watt berarti makin besar arus output hingga makin tinggi batas nilai saturasi yang diperlukan. Jadi yang menentukan besar core adalah arus bukan watt. Untuk mengetahui secara pasti harus menggunakan bantuan software pabrikan core seperti link di atas. Sebagai referensi awal berdasarkan hasil praktek, berikut adalah perkiraan penggunaan core yang sudah teruji di lapangan:

Core	Max. Arus Output Rata-Rata
MS130	5-10A
T130	5-10A
MS157	15 – 20A
T157	15 – 20A

Hal ketiga yang tak kalah penting adalah karakteristik yang menentukan sifat-sifat yang perlu diperhatikan dalam design. Bukan berarti mana baik mana buruk tetapi pemilihan disesuaikan dengan aplikasi. Sifat-sifat ini menentukan jumlah lilitan, besar fisik, tingkat panas yang diperbolehkan dan losses. Sehingga sebaiknya selalu mengacu pada datasheet pabrik. Contoh data pabrik Kool Mu.

<http://www.mag-inc.com/products/powder-cores>

	Kool Mu	MPP	High Flux	XFLUX	AmoFlux
Perm	14-125	14-550	14-160	26-60	60
Core Loss	Low	Very Low	Moderate	High	Low
DC Bias	Good	Better	Best	Best	Better
Saturation Flux Density (Tesla)	1.0	0.75	1.5	1.6	1.5
Curie Temperature (°C)	500	460	500	700	400
Operation Temp. Range (°C)	-55~200	-55~200	-55~200	-55~200	-55~155
60u, u flat to...	900 kHz	2 MHz	1 MHz	500 kHz	2 MHz

Berikut daftar jumlah lilitan untuk core tertentu pada frekuensi PWM antara 250 s.d. 300kHz dan juga kapasitor dari hasil praktek selama ini:

Core	uH	Jumlah lilitan
Arnold MS130	35 – 22 uH	26 - 30 lilit
Arnold MS157	35 – 22 uH	24 - 28 lilit
Arnold MS130 dobel	35 – 22 uH	16 - 22 lilit
Micrometal T130	35 – 22 uH	45 - 55 Lilit
Micrometal T157	35 – 22 uH	45 - 55 Lilit
Kool Mu T157	35 – 22 uH	40 - 50 Lilit

Untuk besarnya kapasitor LPF tergantung tinggi rendahnya switching PWM karena fungsi kapasitor untuk memotong ripple sisa PWM. Makin rendah kecepatan switching makin besar ripple dan sebaliknya. Sebagai patokan berikut tabel kapasitor LPF:

PWM	Besar kapasitor
150 – 200 kHz	1 uF
200 – 250 kHz	680 uF
250 – 325kHz	470 uF
325 – 400kHz	390 uF

Referensi:

<http://www.ti.com/lit/an/sloa119b/sloa119b.pdf>

<http://www.irf.com/product-info/audio/classdtutorial2.pdf> Chapter 4.