Kola cevnih pojačavača

Od SRPP-a i µ-sledila do OTL konstrukcija

Peter Dieleman

Agencija Eho
www.infoelektronika.net

- Sva prava zadržana. Nijedan deo ove knjige ne sme biti reprodukovan u bilo kom materijalnom obliku, uključujući fotokopiranje ili slučajno ili nenamerno smeštanje na bilo koji elektronski medijum sa ili uz pomoć bilo kog elektronskog sredstva, bez pismenog odobrenja nosioca autorskih prava osim u skladu sa odredbama zakona o autorskim pravima, dizajnu i patentima iz 1988. godine ili pod uslovima izdatim od Copyright Licensing Agency Ltd, 90 Tottenham Court Road, London, England W1P 9HE. Prijave za pismene dozvole radi štampanja bilo kog dela ove publikacije upućuje se izdavaču ove knjige.

- Izjava: Autor i izdavač su uložili najveće napore da bi se obezbedila tačnost informacija sadržanih u ovoj knjizi. Autor i izdavač ne mogu da pretpostave neprijatnosti i ovom izjavom isključuju bilo kakvu odgovornost za bilo koju stranku koja bi imala gubitke ili štetu uzrokovanu greškama ili propustima u ovoj knjizi, bez obzira da li su greške ili propusti nastali usled nemara, nezgode ili bilo kog drugog razloga.

ISBN 978-86-80134-63-5
Kola cevnih pojačavača
Naslov originala: Tube Amplifier Circuits
Autor: Peter Dieleman

Prevod: Vladislav Stefanović
Recenzent: Aleksandar Jevtić
Izdaje i štampa: Agencija Eho, Niš
e-mail: redakcija@infoelektronika.net

Tiraž: 200
Godina izdanja: 2026

CIP - Каталогизација у публикацији Народна библиотека Србије, Београд

621.375:621.385(035)

ДИЛЕМАН, Питер
Kola cevnih pojačavača : od SRPP-a i µ-sledila do OTL konstrukcija / Peter Dieleman ; [prevod Vladislav Stefanović]. - Niš : Agencija Eho, 2026 (Niš : Agencija Eho). - 364 str. : ilustr. ; 24 cm

Prevod dela: Tube Amplifier Circuits. - Tiraž 200. - Bibliografija: str. 362-363.

ISBN 978-86-80134-63-5

a) Електронске цеви -- Приручници b) Појачавачи -- Приручници

COBISS.SR-ID 199340809

Koncepti ukratko ..... **I**
SRPP I
Podica µ-sledila III
OTL V
Predgovor **14**
Uvod **16**
1 Konvencije i oznake **18**
2 Predznanje **21**
2.1 Zakon stepena 3/2 21
2.2 Karakteristike trioda i pentoda 23
2.3 Zamenski model elektronske cevi 26
2.4 Pojačanje i impedanse 27
2.5 Izlazna impedansa 28
2.6 Radne tačke izlaznih trioda 29
2.7 Stepen korisnog dejstva 30
2.7.1 Pentoda u klasi A 31
2.7.2 Trioda u klasi A 33
3 Konstanta µ **37**
3.1 ECC83 37
3.2 PCF82 39
3.3 ECC81 41
3.4 6SN7 i 12SN7 42
3.5 12AY7 43
3.6 Ostatak svih trioda 44
4 Izobličenje **45**
4.1 Prvo upoznavanje 45
4.2 Suzbijanje izobličenja 51
4.3 O uticaju radne prave 52
4.3.1 Izračunavanje uticaja Ra/ri 53
4.3.2 Računski primer 54
5 Izobličenje i negativna povratna sprega **55**
5.1 Pojačanje 55
5.2 Propusni opseg 56

5.3 Izobličenje....56
5.3.1 Stepeni red....57
5.4 Isti efekat u pojačavaču sa otpornikom....60
5.5 Unutrašnja naspram spoljne povratne sprege....62
6 Osnove SRPP-a....64
7 Matematika SRPP-a....66
7.1 Simetrični SRPP....68
7.1.1 Izlazna impedansa....68
7.1.2 Dinamička strmina....69
7.2 Asimetrični SRPP....69
7.2.1 Pojačanje....71
7.2.2 Izlazna impedansa asimetričnog SRPP-a....72
7.3 Poređenje simetričnog i asimetričnog SRPP-a....74
7.4 Zaključci....74
8 Obmanjujući SRPP....75
8.1 Malo izobličenje....77
8.1.1 Pozitivan signal daje veću struju....79
8.1.2 Negativan signal daje manju struju....79
8.2 Obično pojačalo sa anodnom otpornošću....80
9 Detaljna razrada cevi za SRPP....82
9.1 ECC83 sa Ub = 500 V....82
9.1 Zaključak....83
9.1.1 Pozitivan signal na rešetki....83
9.1.2 Negativan signal na rešetki....85
9.1.3 Izobličenje....85
9.1.4 Zaključak....86
9.1.5 Izlazna impedansa....87
9.2 Prvi međurezultat....87
9.2.1 ECC83 sa Ub = 300 V....87
9.2.2 Pozitivan signal na rešetki....89
9.2.3 Negativan signal na rešetki....89
9.2.4 Izobličenje....89
9.3 Drugi međurezultat....90
9.4 ECC82 sa Ub = 540 V....90

9.4.1 Pozitivan signal na rešetki 92
9.4.2 Negativan signal na rešetki 92
9.4.3 Izobličenje 92
9.5 Treći međurezultat 92
9.6 ECC81 sa Ub = 506 V 93
9.6.1 Pozitivan signal na rešetki 94
9.6.2 Negativan signal na rešetki 94
9.6.3 Izobličenje 94
Zaključak odeljka 9.6 95
9.7 Četvrti međurezultat 95
9.8 ECC88 95
9.8.1 Pozitivan signal na rešetki 98
9.8.2 Negativan signal na rešetki 98
9.8.3 Izobličenje 98
9.9 12AY7 sa Ub = 508 V 99
9.9.1 Pozitivan signal na rešetki 100
9.9.2 Negativan signal na rešetki 100
9.9.3 Izobličenje 100
9.10 6SN7 sa Ub = 492 V 100
9.10.1 Pozitivan signal na rešetki 102
9.10.2 Negativan signal rešetke 102
9.10.3 Izobličenje 102
9.11 6SN7 sa Uak = 270 V 103
9.11.1 Pozitivan signal na rešetki 104
9.11.2 Negativan signal na rešetki 104
9.11.3 Izobličenje 104
9.12 ECC83 sa izlaznim signalom od 240 Vtt 105
9.12.1 Pozitivan signal na rešetki 105
9.12.2 Negativan signal na rešetki 106
9.12.3 Izobličenje 106
9.13 ECC99 106
9.13.1 Pozitivan signal na rešetki 111
9.13.2 Negativan signal rešetke 111
9.13.3 Izobličenje 111

9.14 6FQ7 sa Uak = 250 V 112
9.14.1 Pozitivan signal na rešetki 113
9.14.2 Negativan signal na rešetki 113
9.14.3 Izobličenje 113
9.15 Zaključni pregled 114
10 Touzeletov pristup 115
10.1 Rešenje pomoću matrične algebre 116
10.2 Razrada korak po korak 118
11 Uticaj razlika u vrednostima μ i p 122
11.1 Različite vrednosti μ 122
11.2 Različite vrednosti perveanse 127
12 Pregled i zaključci 132
12.1 Kolo 132
12.2 DC radne tačke 132
12.3 Izbor cevi 133
12.4 Perveansa 136
12.4.1 6SN7 sa negativnim naponom rešetke od 8 V 136
12.4.1.1 Pozitivan signal rešetke 137
12.4.1.2 Negativan signal rešetke 137
12.4.1.3 Izobličenje 138
12.5 Poređenje tri triode 138
12.6 Konačni zaključak 139
13 Uvod u pojačavače sa aktivnim opterećenjem 141
13.1 Prvi pokušaj razrade 143
14 μ-sledilo (μ-follower) 145
14.1 Princip 145
14.2 Kakva poboljšanja dobijamo? 148
14.3 Nedostatak 149
14.4 Izbor cevi 149
15 β-sledilo 152
15.1 Rešenje sa tranzistorom 153
15.2 Rešenje sa FET-om 156
15.3 Izbor cevi 158
15.4 Izlazna impedansa 159

16 µ-pojačavač sa pentodom 160
16.1 Opterećenje je pentoda 160
16.2 Elektrolitski kondenzatori za razdvajanje 163
16.3 Nedostatak 164
17 µ-stepen sa butstrepovanom pentodom 168
18 Poluprovodnički izvor struje 170
18.1 Objašnjenje šeme 171
19 OTL, odnosno izlazni stepeni bez izlaznog transformatora 174
19.1 Teorijski model 175
19.2 Šema televizijskog izlaznog stepena 178
20 Philipsov televizor 21CX172A 179
21 Dva izlazna stepena Philipsovog radio-prijemnika B7X63A 181
21.1 Izlazni stepen 182
21.2 Šema 184
22 Philipsov eksperimentalni pojačavač HF303 187
22.1 Karakteristike 187
22.2 Kolo 188
22.3 Teorija 189
22.3.1 Pojačanje 192
22.3.2 Izobličenje 193
22.4 Zaključak 194
22.5 Primena jednačine (22.12) 194
22.6 Izobličenje trećeg harmonika 195
22.7 Teorijski deo: proračun izobličenja 196
22.7.1 Za drugi harmonik 197
22.7.2 Za treći harmonik 198
23 Izlazni stepen sa 6C33C 200
23.1 Katodno sledilo 202
23.2 Druga varijanta 203
23.3 Push-Pull varijanta 203
23.4 Vitstonov most 204
23.5 Varijanta Futermana 205
23.6 Varijanta Technics 207

23.7 Proračuni Technicsove varijante 208
23.8 Efikasnost 210
23.9 Izobličenje 212
24 Napajanje je važno 214
24.1 Napajanje grejnih vlakana SRPP-a 214
24.1.1 Prvo rešenje 215
24.1.2 Drugo rešenje 215
24.2 Napajanje grejača u stepenima sa aktivnim opterećenjem 218
24.3 Više namotaja radi sprečavanja oštećenja 219
24.4 Visok napon napajanja 219
24.5 Faktor potiskivanja napona napajanja (PSRR) 222
25 Frekventne karakteristike 223
25.1 Milerov efekat 223
25.2 Otpor naizmenične struje kola sa aktivnim opterećenjem 224
25.3 SRPP 225
25.4 Kola sa aktivnim opterećenjem 225
25.4.1 Prva tačka 225
25.4.2 Druga tačka 225
25.5 Niske frekvencije 226
26 Kaskoda (Cascode) 228
26.1 Pogrešna kaskoda 230
27 Originalni SRPP patent sa brojem 2,310,342 231
28 Vajtovo katodno sledilo 233
29 Nepotrebno µ-sledilo 236
30 Dvostruki SRPP ili Bel Canto 239
30.1 Analiza 239
30.1.1 Levi deo 240
30.1.2 Desni deo 241
30.2 Francuski Elektuur forum 242
30.3 Zaključak 243
30.4 Još jedna egzotika 244
31 Loš dizajn, dobar test slušanja 245
32 OTL sa SRPP predfazom 249

33 Dannerov OTL 252
33.1 Zaključak 255
34 SRPP fazni razdelnik 257
34.1 Prvi pokušaj sa SRPP 260
34.1.1 Simetrični SRPP 261
34.1.2 Drugi pokušaj, asimetrični SRPP 262
34.1.3 Poslednja kap SRPP 262
34.1.4 Preliminarni zaključak za SRPP fazni razdelnik 262
34.2 Fazni razdelnik u kombinaciji sa µ-sledilom 263
34.3 Projektovanje neposrednim proračunom 264
34.3.1 Kolo za SRPP fazni razdelnik 266
34.3.4 Performanse 267
34.3.1.1 Pozitivan signal na rešetki 268
34.3.1.2 Negativan mrežni signal 268
34.3.1.3 Izobličenje 269
34.3.2 Konačan zaključak za SRPP fazni razdelnik 270
35 Izlazni stepen sa pravim triodama 6BX7 271
35.1 Lažna trioda 271
35.1.1 Princip 272
35.1.2 Razlika u tonu 274
35.1.3 Poređenje 275
35.2 Paralelno povezivanje cevi 276
35.2.1 Protivargument 278
35.3 Poređenje fiksnog negativnog prednapona upravljačke rešetke i premošćenog katodnog otpornika 280
35.4 Nacrt 281
35.4.1 Izlazni stepen 283
35.4.2 β-sledilo 284
35.4.3 Fazni razdelnik 285
35.4.4 Negativan napon napajanja 286
35.4.5 Podesivi negativni napon rešetke (NGV) 286
35.4.6 Naponi napajanja 287
35.4.7 Napajanje grejnih vlakana 288
35.4.8 Konstrukcija 289

36 Pojačalo sa 6AS7 i SRPP-om 291
36.1 Cev 6AS7 291
36.2 Izlazni stepen 293
36.2.1 Podešavanje 295
36.2.2 Katodni napon izlazne cevi 295
36.3 SRPP pobudni stepen 297
36.4 Fazni razdelnik 298
36.5 Tonske kontrole 299
36.6 Ulazni stepen 300
36.7 Napajanje 301
36.7.1 Visok napon 302
36.7.2 Visoki napon za SRPP 304
36.7.3 Napajanje grejnih vlakana 305
36.7.4 Stabilizator 307
36.7.5 Negativno napajanje 308
36.7.6 Prednapon (NGV) 308
36.8 Primar transformatora i osigurači 309
36.9 Pojave pri uključivanju 310
36.10 Negativna povratna sprega 311
36.11 Konstrukcija 312
36.11.1 Numerisanje cevi 313

37 Dodatak A - Internet adrese 316

38 Dodatak B - Stepeni redovi i njihov inverz 317
38.1 B.1 Uvodni grafikoni 318
38.2 B.1.1 Opadajuća frekventna karakteristika 318
38.3 B.1.2 Karakteristika diode 319
38.4 B.2 - Inverzna funkcija 320
38.5 B.2.1 Crtanje inverza 321
38.6 B.2.2 - Izračunavanje inverznog, odnosno „obrnutog" reda 323
38.6.1 B.2.3 Konvergencija — da li inverz postoji? 326

39 Dodatak C - Teorija cevi 327
39.1 C.1 - Ponovljen jednostavan model 327
39.2 C.2 - Prošireni model 328
39.3 C.3 - Snaga grejanja i temperatura 339

39.4 C.4 - Istorijski razvoj znanja o emisiji 341
39.5 C.4 - Zaključak 344
40 Dodatak D - Grafička metoda za izračunavanje izobličenja....345
40.1 Proračun izobličenja drugim harmonikom....345
40.2 Proračun izobličenja trećim harmonikom 349
41 Dodatak E - Izobličenja katodnog sledila....353
41.1 Proračun izobličenja 355
41.1.1 ECC82 355
41.1.2 ECC83 356
41.1.3 ECC81 356
41.1.4 6SN7....356
41.2 Zaključci 357
42 Dodatak F - Mitovi 358
42.1 Različite impedanse kengur faznog razdelnika....358
42.2 Potreba za katodnim sledilom posle SRPP-a....360
43 Literatura 362
44 Završna razmatranja....364

Koncepti ukratko

U ovoj knjizi opisano je nekoliko koncepata. Kratak uvod može biti od pomoći.

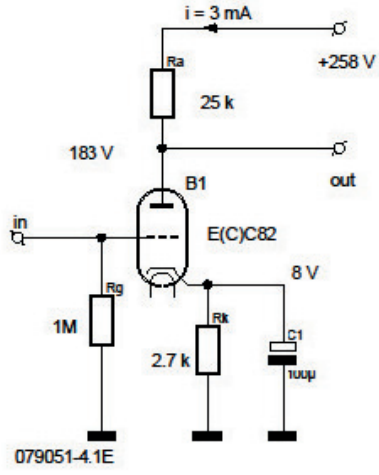
SRPP

Ovaj princip je detaljno opisan u poglavljima od 6 do 9.

Izobličenje cevi zavisi od amplitude signala.

Svrha SRPP-a je da se dobije sklop koji može da proizvede velike izlazne signale uz minimalno izobličenje.

Objašnjenje počinje slikom 6.1.



Slika 6.1 Klasično pojačalo sa anodnim otpornikom

$$Amp = -\mu \cdot \frac{R_a}{R_a + r_i} \tag{2.8}$$

U ovoj jednačini μ je faktor pojačanja triode.

Navodi se da je μ ≈ 17 za ECC82/12AU7 (μ ≈ 100 za ECC83/12AX7).

Nažalost, vrednost r_i u (2.8) zavisi od veličine signala.

Kada se primeni ulazni signal od 4 V_t, pozitivni izlazni naponski zamah iznosi 35 V_t, a negativni naponski zamah 48 V_t .

To je izobličenje. Ono je posledica ponašanja triode.

Sve je to opisano u poglavlju 4.

Ako bismo u (2.8) anodni otpornik Ra zamenili triodnim kolom kao što je donja ECC82, dobili bismo:

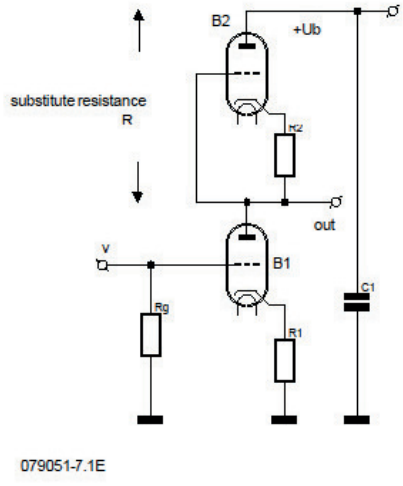
$$Amp = -\mu \cdot \frac{r_i}{r_i + r_i} \quad \text{ili } Amp = -½\,\mu$$

Ovaj faktor ½ karakterističan je za pravilno konstruisan SRPP.

I μ može zavisiti od veličine signala.

Pri izboru odgovarajuće triode to nije slučaj. ECC83 i 6SN7 (μ ≈ 20) imaju konstantno μ, kao što je opisano u poglavlju 3.

Tada bismo dobili ovakav sklop:



Slika 7.1 Osnovni SRPP

Ovde postoji mnogo mogućnosti da se napravi pogrešan sklop, ali je za svaku od njih prikazano rešenje.

Najčešće viđena greška jeste premošćavanje R1 kondenzatorom, ali ne i R2.

Oba moraju biti premošćena kondenzatorom ili nijedan.

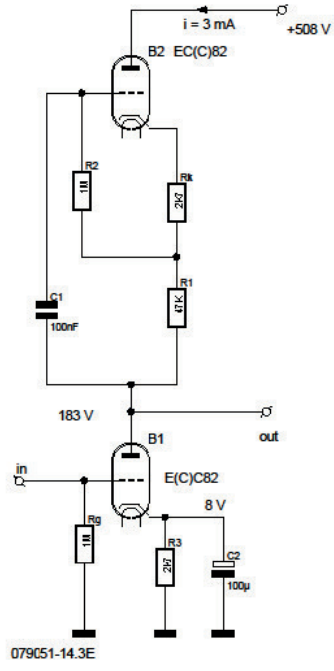
Porodica µ-sledila

Ovo je detaljno opisano u poglavljima od 13 do 18.

I ovde je svrha da se dobije sklop koji može da proizvede velike izlazne signale uz minimalno izobličenje.

Sklopovi mogu izgledati slično, ali principi na kojima se zasnivaju potpuno su različiti.

Evo principijelne šeme:



Slika 14.3 Jednostavno µ-sledilo

Ponovo su dve kompletno povezane cevi postavljene jedna iznad druge.

Osnova ovog principa proizlazi iz:

$$Amp = -\mu \cdot \frac{r_a}{r_a + r_i} \quad \text{ili takođe} \quad Amp = -\mu \cdot \frac{1}{1 + \frac{r_i}{r_a}} \tag{3.1}$$

U odeljku 4.3 prikazan je uticaj radne prave na izobličenje.

Što je vrednost R_a veća, izobličenje je manje.

U stvari, bitan je odnos r_i / R_a ili r_i / r_a.

U poglavlju 4 prikazane su dve važne jednačine:

$$d_2' = \frac{d_2}{(1 + \frac{R_a}{r_i})^2} \tag{4.5}$$

i

$$d_3' = \frac{d_3}{(1 + \frac{R_a}{r_i})^3} \tag{4.6}$$

Ovde su d_2 i d_3 strujna izobličenja 2. i 3. harmonika kada je $R_a = 0$.

d'_2 i d'_3 predstavljaju izobličenja kada postoji Ra.

Iz (4.5) vidimo da se izobličenje smanjuje.

Što je vrednost R_a veća, imenilac je veći, pa je i smanjenje veće.

Ideja na kojoj se zasniva porodica μ-sledila jeste stvaranje velike r_a, bez problema zbog pada jednosmernog napona na ugljeničkom otporniku Ra.

Ako izaberemo R_a = 1 MΩ i imamo struju I_a = 1 mA, na ovom R_a bismo imali 1.000 V.

Ako R_a zamenimo kolom koje ima visoku impedansu r_a i mali jednosmerni otpor, problem je rešen. Poznato je da pentoda ima ovu osobinu.

Ovde simulirana impedansa iznosi 916 kΩ, dok je pad jednosmernog napona i dalje oko 300 V.

Naučićemo kako da to uradimo bolje.

Kada je simulirano r_a veliko, Amp se približava μ, odnosno Amp ≈ −μ.

Ovo je karakteristika svih μ-sledila.

Uporedite to sa Amp = −½ μ kod SRPP-a.

μ-sledilo često nalazimo u kombinaciji sa SE izlaznim stepenom sa WE300.

Kao kod SRPP-a, i ovde se lako pravi greška.

Frekvencijska karakteristika μ-sledila osetljiva je zbog visokih impedansi. Setite se ove poznate jednačine:

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

Sve je to opisano u poglavlju 25.

OTL

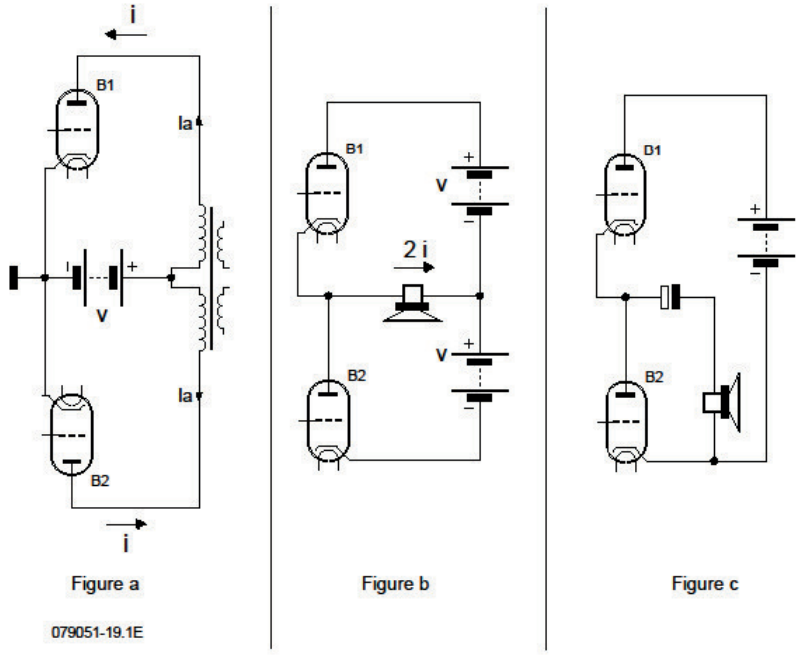
Godine 1965. izlazni stepen je imao cev (obično pentodu) i izlazni transformator.

Transformatori su bili teški i skupi, a frekvencijska karakteristika im je bila loša. Korekcije su vršene primenom negativne povratne sprege, sa svim njenim nedostacima.

Philips je u to vreme pokušao da transformator zameni pentodom, uz upotrebu zvučnika od 800 Ω. Konstruisane su posebne cevi poput EL86 i PL84.

Ovo rešenje se široko koristilo u televizorima i skupljim radio-prijemnicima.

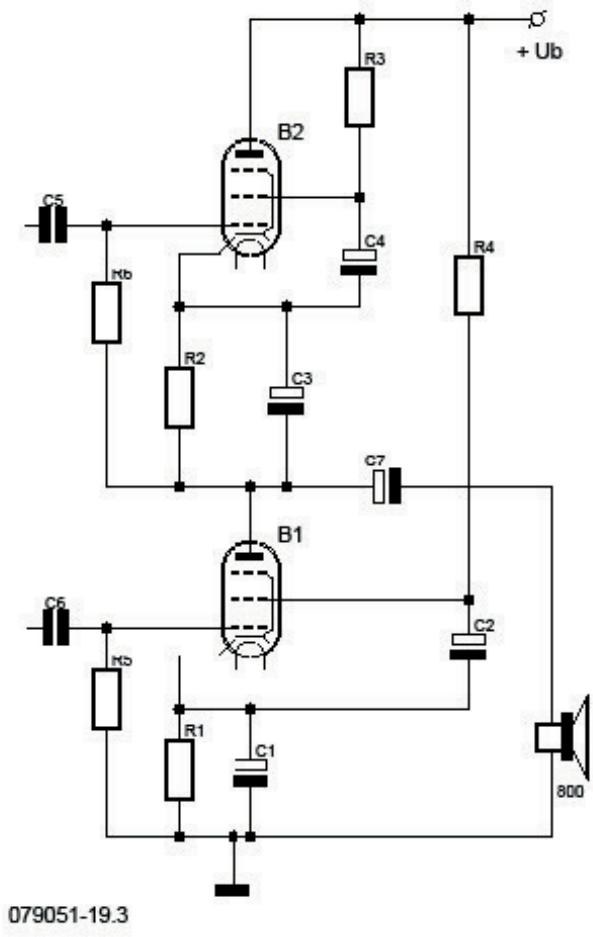
Evo principijelne šeme:



Slika 19.1 Balansni izlazni stepeni

Na slici 19.1b zvučnik i baterije zamenili su mesta.

Evo principijelne šeme:



Ponovo postoje mnoge komplikacije koje su objašnjene i rešene.

U poglavlju 22 opisano je pojačalo Philips HF303.

To je majka svih OTL pojačala. Kvalitet se ne može poboljšati.

Iza njega stoji lepa teorija.

Najčešće viđena konstrukcija koristi ruske cevi 6C33. Videti poglavlje 23.

Karakteristika ovih cevi je izuzetno velika potrošnja snage.

Samo snaga grejanja iznosi 320 W.

Predgovor

Godine 2004. Elektor je objavio moju prvu knjigu: 'Theorie en Praktijk van Buizenversterkers'.

Knjiga je bila uspešna i ubrzo je prevedena na francuski i na nemački. 'Théorie & pratique des amplificateurs audio à tubes' bio je francuski naslov. Nemački naziv bio je 'Theorie und Praxis des Röhrenverstärkers'.

Napisao sam knjigu zato što u to vreme znanje o cevima nije bilo lako dostupno.

U nemačkoj knjizi Elektuur-a 'Audio en HiFi-buizen', autor Rainer zur Linde opisao je SRPP drajver koji je K. Anzai izumeo 1969. godine. Zapitao sam se zašto bi takav SRPP bio bolji od klasičnog pojačavača sa anodnim otpornikom.

Počeo sam da radim proračune za tu konstrukciju. Bila je pogrešna. Otkrio sam najčuveniju grešku (katodni elko).

Zainteresovao sam se, a kasnije sam saznao da su u tom kolu bile tri greške pomenute u ovoj knjizi o SRPP-u.Iako je kolo bilo pogrešno, ideja je bila inspirativna. Istraživao sam i jedno od kola u mojoj prvoj knjizi imalo je takav SRPP, ali sada bez grešaka.

U narednim godinama nastavio sam da istražujem SRPP kola, ali i μ-sledbenike i OTL kola.

Godine 2009. Elektor je objavio moju drugu knjigu o ovim temama.Odmah je prevedena na nemački jezik.

Danas Elektor i ja i dalje dobijamo zahteve za ponovno štampanje. Knjige više nisu dostupne.Elektor je odlučio da ih ne štampa ponovo, već da knjigu prevede na engleski jezik i tako dosegne mnogo širu čitalačku publiku.

Rezultat je bio englesko izdanje knjige. Ono je donekle prerađeno. Holandsko izdanje sadržalo je nekoliko sitnih grešaka, a moje znanje se tokom proteklih godina proširilo.

Smatram da je ovo izdanje znatno bolje od holandskog i nemačkog.

Dosledno je u stilu i mnogo preciznije u pojedinostima.Smatram da je ova verzija mnogo bolja od holandske i nemačke.

Želim da zahvalim Janu Didenu, koji je podstakao Elektor i mene da prihvatimo posao prevođenja i objavljivanja. Stupio sam u kontakt s njim i podstakao me je da maja 2023. godine u časopisu audioXpress objavim članak „Myths in Tube Circuit Design".

Zahvaljujem Menu van der Venu na nadahnjujućim rečima i prijateljstvu tokom proteklih mnogo godina.

Zahvaljujem Patriku Vildersu iz Elektora što je rukopis pretvorio u lepo oblikovanu knjigu.

Nekoliko meseci nakon objavljivanja, u julu 2026. godine, Vladislav Stefanović iz InfoElektronike nam se obratio navodeći da želi da prevede englesko izdanje na srpski jezik. Takođe me je podstakao da dodam uvodno poglavlje „Koncepti ukratko".

Uradio je izvanredan posao. Ne samo da je preveo tekst već je pronašao i brojne, uglavnom algebarske, greške koje niko ranije nije primetio.

Zahvalan sam mu i zaslužio je moje najveće poštovanje.

Sve u svemu, ovo srpsko izdanje postalo je najbolje i najtačnije od sva četiri.

Napomena: U ovoj knjizi težište je stavljeno na objašnjenje osnovnih koncepata, načina rada kola i postupaka projektovanja. Iako su tekst i proračuni pažljivo pregledani, moguće je da su u pojedinim primerima ostale računske ili numeričke greške.

Čitaocima se zato preporučuje da matematičke rezultate i vrednosti elemenata provere pre njihove praktične primene, naročito pri radu sa kolima u kojima su prisutni visoki naponi.

Uvod

Cevni pojačavači pate od izobličenja.

Srećom, postoje SRPP pojačavači, μ-sledila (μ-follower), β-follower (katodno sledilo). Svi oni daju minimalno izobličenje čak i pri izlaznim naponima od 50 do 100 V_t.

Često se ove konstrukcije objavljuju sa greškama u sebi. Pokazuje se da je lako napraviti pogrešnu konstrukciju kada nemamo dobro razumevanje teorije. U prvom odeljku ove knjige istražujemo poreklo izobličenja, a zatim konstrukciju SRPP-a i μ-followera.

Na internetu možemo naći najegzotičnije konstrukcije. Njihovo vrednovanje nas uči da te konstrukcije često stvari čine gorim nego što su po svojoj prirodi. U poglavlju o pogrešnim SRPP-ovima i μ-followerima ponekad vidimo bizarne, ali i promašene konstrukcije, kod kojih bi jednostavan pojačavač sa jednom triodom radio mnogo bolje.

Postoje Puš-Pul izlazni stepeni. Oni se razmatraju i posmatra se sličnost sa SRPP-om. To se naročito radi kroz teoriju koja stoji iza OTL-a zasnovanog na 'majci' svih OTL-ova, Philips HF303.

Na kraju se pažnja posvećuje frekvencijskim karakteristikama i tehničkim pitanjima kao što su napon napajanja i napajanje grejanja cevi. Da bi se stvari ilustrovale, dato je nekoliko konstrukcija koje opisuju razmatrane teme.

Ova knjiga opisuje mnogo nove teorije koja ranije nije objavljena. Često ona predstavlja pravo otkriće, jer pokazuje da većina stvari ima lepu i neočekivanu jednostavnost.

Odeljak 1

Predznanje

1 Konvencije i oznake

U naučnim publikacijama je uobičajeno da autor sebe naziva 'pisac'. On takođe koristi reč 'čitalac'. Ja više volim šarmantnije 'ja' i 'vi'. Prenošenje znanja je zajednički napor. U ovoj knjizi ću koristiti 'imamo', 'možemo videti' i tako dalje.

U ovoj knjizi pokušavamo dosledno koristiti niz oznaka i konvencija. One su opisane u nastavku.

Svi jednosmerni (DC) naponi, struje i otpornosti označeni su kosim velikim slovima U, I i R.

Dva primera: U_{ak} jednosmerni napon između anode i katode;
R_a: anodna otpornost.

U engleskoj literaturi napon napajanja se često naziva HT (**H**igh **T**ension), ali u ovoj knjizi je označen sa U_b. Ovo potiče od njegovog evropskog porekla.

Otpornici koji su numerisani pišu se kao R4 itd. Otpornost je komponenta na šemi. Otpornik je nešto što možete dodirnuti. Može se zagrejati. Ista razlika se pravi za kapacitivnosti u odnosu na kondenzatore. Trioda ili pentoda je ponovo komponenta na šemi. Cev je staklena stvar koja će se razbiti kada vam ispadne iz ruku. Zagreva se. Cev kao što je ECC83 ili 12AX7 sadrži dve triode. Uporedite samoindukciju u odnosu na fizički kalem.

Transformator se često naziva trafo.

Vrednost otpornosti se piše kao 6.8 kΩ. Na šemama se ovo često prikazuje kao 6K8. Ovo je stara navika holandskog časopisa Elektor.

Maksimalna vrednost snage koju otpornik mora biti u stanju da izdrži navodi se samo kada je to relevantno.

Svi naizmenični (AC) naponi, struje i impedanse označeni su malim slovima. Za naizmenične napone koristimo slovo v; a ne malo slovo u. Jedinica je naravno volt ili V za jednosmernu struju (DC). Za naizmenične (AC) signale koristimo 'volte'.

Osim u kolima napajanja, nikada ne koristimo efektivne vrednosti poput 20 V_{eff}. Nema smisla dati triodi signal rešetke od 10 V_{eff}. Ono što se računa je vršna ili maksimalna vrednost.

Gde je potrebno, koristimo vršne vrednosti označene sa V_t ili V_{tt}, iako drugi možda preferiraju V_p ili V_{PP}. V_p je rezervisano za V_{plate} (napon anode) pentode.

U teoriji električnih mreža koristi se reč ekscitacija (pobuda). To znači dovođenje signala u kolo. Mi ćemo koristiti običniju reč upravljački ili pobudni signal. Auto ima volan; cev ima upravljačku rešetku, koja se takođe naziva kontrolna rešetka.

Za naizmenične struje koristimo malo slovo i. Ovde takođe koristimo samo vršne vrednosti. Za naizmenične otpornosti ili impedanse koristimo malo slovo r.

U ovoj knjizi nikada nema potrebe za kompleksnim impedansama poput R+jωL.

Dve naizmenične otpornosti su od posebnog značaja. To su r_i i r_p. Prva je naizmenična otpornost koju vidimo, gledajući u kolo. Obično to znači unutrašnju otpornost triode: $r_i = \frac{\Delta U_{ak}}{\Delta I_a}$.

Sa r_p se misli na istu jednačinu, ali za pentodu. Ovde slovo p stoji za američku reč plate (ploča/anoda); otpornost anode.

U otpornostima i naponima, katoda se ne piše sa 'c' već sa 'k' kao u U_{ak}. Vrednost elektrolitskih kondenzatora je data u μF. U tekstu se nazivaju elko. I elko na šemi i fizički elko nazivaju se elko tj. Elektrolitski kondenzator. Maksimalni dozvoljeni napon je naveden samo kada je to relevantno. Svi ostali kapaciteti su dati u pF ili nF.

Kada koristimo reč rešetka, mislimo na G1 cevi. Jednosmerni naponi rešetke su uvek negativni u odnosu na napone katode. Postoji izraz NGV. Ovo znači negativni napon rešetke (**N**egative **G**rid **V**oltage). Možemo imati NGV = 4 V ili U_{gk} = -4 V. Obratite pažnju na znak minus.

U ovoj knjizi nikada ne koristimo pozitivne napone rešetke koji podrazumevaju struju rešetke. Ovi pozitivni naponi rešetke se koriste u preklopnoj elektronici i u dizajniranju radara. U stvari, svi naponi na cevi su u odnosu na napon sa katode.

Ova knjiga je prevedena sa američkog engleskog na srpski jezik.U formulama i jednačinama zadržana je decimalna tačka „ . “, kao u originalnom izdanju, dok je u tekućem tekstu korišćen decimalni zarez „ , “ u skladu sa srpskim pravopisom.

Tako, na primer, rezultat 5.15 u formuli u tekstu može biti naveden kao 5,15. Nismo želeli da menjamo veliki broj formula, jednačina i oznaka na šemama, jer bi takve izmene mogle dovesti do neželjenih grešaka. Verujemo da ova razlika čitaocu neće stvarati zabunu.

Strmina (transkonduktansa) triode ili pentode se označava velikim slovom S.

Koristimo definiciju: $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{gk}}$.

Ovo je situacija bez prisustva anodne otpornosti. Ukazuje na ponašanje 'gole' triode/pentode.

Kada govorimo o strmini triode/pentode u kolu, koristimo malo slovo *s*, što označava takozvanu dinamičku strminu. Reference su [Dieleman]. Pomenute su u poglavlju sa referencama. Računanje i proračuni odnose se na izvođenje jednačina. Koristim termine izračunati, izračunavanje i proračuni kada se radi o dobijanju numeričkih vrednosti.

2 Predznanje

Da biste mogli da razumete materijal u ovoj knjizi, neophodno je poznavanje cevi i kola. Mogli bismo ovde izvesti svo ovo znanje, ali ono se može naći u nekoliko dobrih knjiga. Kao kompromis, ovde su predstavljeni neki rezultati, gde ćete naći reference na [Dieleman]. Do ovih knjiga (na holandskom, nemačkom i francuskom) je međutim teško doći.

2.1 Zakon stepena 3/2

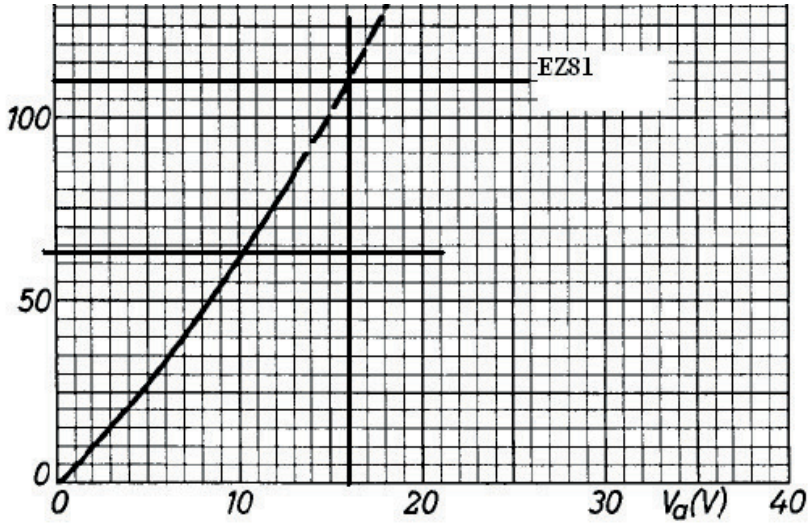
Odnos između struje kroz diodu i napona na njoj zadovoljava takozvanu Čajld-Lengmirovu (Child-Langmuir) jednačinu.

$$I = \frac{4}{9}\varepsilon_0 \frac{A}{b^2}\sqrt{\frac{2q}{m_e}} \cdot U\sqrt{U} \quad \text{or} \quad I = p \cdot U^{\frac{3}{2}} \tag{2.1}$$

U stvari, to je Čajldova jednačina koju je mnogo godina kasnije proširio Irving Lengmir (Irving Langmuir). Ova Lengmirova jednačina se može naći u dodatku C. A je površina katode, a b je rastojanje između anode i katode.

U jednačini (2.1) parametar p označava perveansa (engl. perveance, odnosno koeficijent propustljivosti cevi). Kada se struja I izrazi u miliamperima mA, a napon U u voltima V, vrednost perveansa za standardne diode obično iznosi oko 1.

Dakle, za struju od I = 64 mA potreban nam je napon od U_{ak} = 16 V.



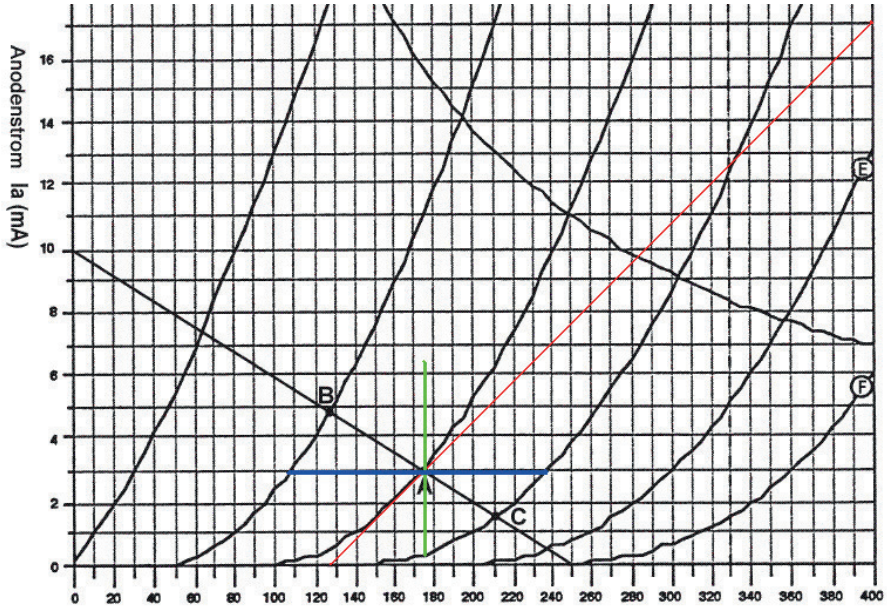
Slika 2.1 U–I karakteristike ispravljačke cevi EZ81

Ispravljačica EZ81 (pogledajte sliku 2.1) ispada skoro duplo veća i ima p ≈ 1.7. Popularne cevi imaju različite perveanse. ECC83 (12AX7) sa U_{ak} = 150 V i U_{gk} = -2 V ima struju od I_a = 3 mA, dok, za razliku od nje, 6SN7 ima struju od I_a = 12.5 mA.

Visoku perveansu dobijamo korišćenjem velike katode. Imajte na umu da temperatura katode nije u Čajldovoj jednačini (Čajldov model je donekle jednostavan). Perveansa, međutim, veoma zavisi od temperature vlakna (grejača).

Ovo je dobar razlog da nikada ne zanemarite tačnu vrednost napona grejanja. Karakteristike cevi važe samo kada se koristi naznačeni napon. U dodatku C, perveansa je dodatno istražena.

2.2 Karakteristike trioda i pentoda



Slika 2.2: ECC82 ili 12AU7
Ovo je nemački grafikon; Anodenstrom znači anodna struja

Na slici 2.2 prikazane su karakteristike cevi ECC82.

Za više negativnih napona rešetke prikazana je struja u zavisnosti od anodnog napona.

Kriva E ima U_{gk} = -16 V, a kriva F ima -20 V. Svaka sledeća kriva nalevo svaki put ima napon U_{gk} manji za 4 V.

Kriva koja prolazi kroz položaj A ima U_{gk} = -8 V.

Ona u položaju C ima -12 V, a ona u položaju B ima -4 V.

Prva leva kriva ima U_{gk} = 0 V. Ona prolazi kroz nultu tačku i zapravo predstavlja karakteristiku diode, poput one koju smo videli kod EZ81.

Čajld-Lengmirova jednačina za triodu je:

$$I = p \cdot (U_{gk} + \frac{U_{ak}}{\mu})^{\frac{3}{2}} \tag{2.2}$$

Iz slike 2.2 možemo zaključiti da pri naponu rešetke U_{gk} = -8 V i anodnom naponu U_{ak} = 175 V teče struja I_a = 3 mA; položaj A.

Podebljana plava horizontalna linija kroz tačku A daje nam faktor pojačanja μ.

Biramo tačku (-8; 175) na liniji od 3 mA. Kada sada pređemo jednu krivu udesno, nalazimo promenu napona rešetke od 4 V.

Odgovarajući anodni napon je 236 V; tačka (-12; 236).

Ako bismo otišli jednu krivu ulevo, dobili bismo U_{ak} = 108 V.

Dakle, pri stalnoj struji Ia = 3 mA nalazimo promenu od 236 - 108 = 128 V.

Odnos ovih promena napona je, prema tome, 128 / 8 = 16.

Po definiciji, to je μ = 16, dok specifikacija za ECC82 navodi μ = 17.

Ti podaci iz specifikacije ne važe uvek potpuno tačno.

Podebljana zelena vertikalna linija kroz A odnosi se na takozvanu transkonduktansu.

Kada, pri 175 V u tački A, odemo 2 V naviše, struja postaje I_a = 6,5 mA; povećanje iznosi 3,5 mA. Kada odemo 4 V naniže, nalazimo smanjenje od 2,5 mA. Ukupna promena I_a iznosi 6 mA. Napon rešetke imao je promenu od 6 V (4 naniže i 2 naviše). Sada je količnik ovih promena, po definiciji, transkonduktansa. To je S = 6 / 6 = 1 mA / V. To nije mnogo; većina trioda ima veću transkonduktansu.

Tangenta u tački A horizontalno prelazi rastojanje od 400 - 127 = 273 V. Vertikalno postoji razlika od 17 - 0 = 17 mA.

Unutrašnji otpor ri zato iznosi 273 / 17 = 16,0625 kΩ.

Množenjem transkonduktanse i tog ri dobijamo 16,06. To mora biti jednako vrednosti μ.

To je poznata Barkhausenova jednačina: $\mu = S \cdot r_i$ (2.3)

Imajte na umu da drugačija radna tačka ima drugačije vrednosti r_i i S.

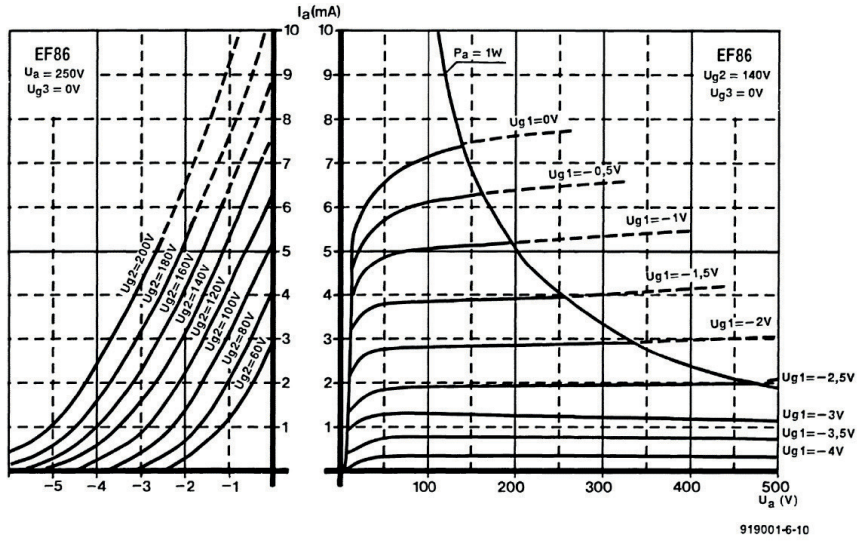
Kod malih signala naći ćemo istu vrednost za μ. Ovaj μ trebalo bi da bude konstanta; on je približno konstantan. O tome govori posebno poglavlje 3.

Upozorenje:
U tački A na slici 2.2 vidimo jednosmerni napon rešetke U_{gk} = -8 V. To znači da ulazni signal mora imati maksimalnu vrednost od 8 Vt. Kada premašimo ovu amplitudu, doći će do pojave struje rešetke (odnosno biće dostignut prag provođenja rešetke). Dok je struja rešetke uobičajena u impulsnim kolima i radarskoj elektronici, u audio-pojačavačima to nikada ne radimo, jer izaziva ogromno izobličenje.

U stvari, za rešetku ostaje prostora samo za 7,5 Vt. Ova nešto niža vrednost posledica je postojanja takozvanog elektronskog prostornog naboja.

Kod cevi ECC8x on iznosi približno 0,5 V.

Objašnjenje je dato u dodatku C, uz prošireni model cevi.



Slika 2.3: Karakteristike malosignalne pentode EF86

EF86 je malosignalna pentoda koja se često koristi u audio-pretpojačavačima.

Kriva za U_{g1} = -3 V savija se naniže u desnom delu desnog grafikona. Kriva na grafikonu najverovatnije je pogrešna[1].

Levo vidimo grafikone na kojima su ucrtani negativni naponi rešetke i odgovarajuće anodne struje. Sve je to pri fiksnom anodnom naponu od 250 V. Imate sreće ako je baš to željeni anodni napon. Tako visok anodni napon neuobičajen je za EF86. Ovi levi grafikoni ne koriste se često.

[1] U herojska vremena, kada nije bilo grafičkih alata i opreme, ovi grafikoni su pravljeni lepljenjem malih gumenih žica na list belog papira. Zatim su fotografisani. Žica za -3 V verovatno je zalepljena pomalo pogrešno. Ovde imamo jednu zanimljivost.

Za skup napona G1 grafikoni su ucrtani u desnom delu slike 2.3. Iz ove grupe krivih možemo mnogo naučiti o transkonduktansi i pojačanju, pa čak i o izobličenju.

Na desnim grafikonima vidimo tipičan oblik pentodnih krivih, sa oštrim savijanjem pri naponima manjim od 50 V. Svi grafikoni su snimljeni pri fiksnom naponu U_{g2} od 140 V.

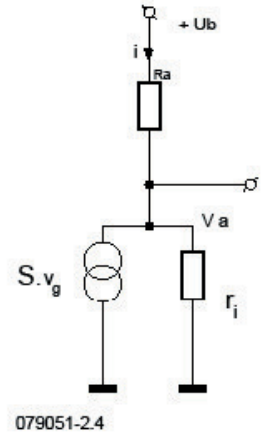
Dalje udesno vidimo da povećanje anodnog napona daje gotovo nikakvu dodatnu struju.

Drugim rečima, pentoda ima veliki r_p. Vrednost od 1 do 2 MΩ lako se nalazi. Poređenja radi, ri izlazne triode iznosi 1 kΩ, a kod malosignalne triode 10 kΩ do 60 kΩ.

2.3 Zamenski model elektronske cevi

Ispod je prikazana ekvivalentna šema triode sa priključenim anodnim otpornikom Ra. Na upravljačku rešetku nije priključeno ništa, jer ona praktično ima beskonačno veliku ulaznu otpornost.

Anodna struja sastoji se iz dve komponente. Leva komponenta potiče od strujnog izvora i iznosi S·Vg. Druga komponenta predstavlja naizmeničnu struju izazvanu promenom anodnog napona i protiče kroz unutrašnji otpor r_i.



Slika 2.4: Zamenski model triode

Definicija transkonduktanse je: $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_{gk}}$ (2.4)

Definicija unutrašnjeg otpora je: $r_i = \frac{\Delta U_{ak}}{\Delta I_a}$ (2.5)

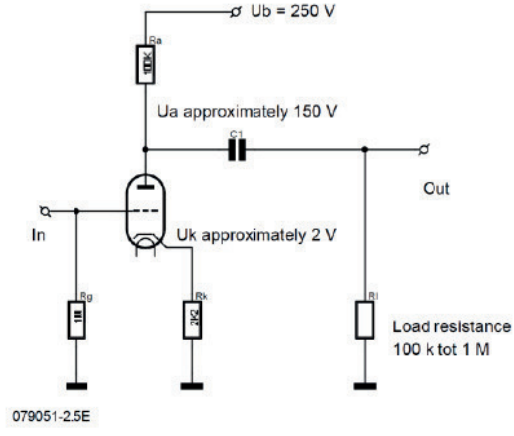
Množenjem S i ri ponovo dobijamo klasičnu Barkhauzenovu jednačinu:

$\mu = S \cdot r_i.$ (2.3)

Definicija faktora pojačanja glasi: $\mu = \frac{\Delta U_{ak}}{\Delta U_{gk}}$ (2.6)

2.4 Pojačanje i impedanse

Počinjemo od jednostavnog kola prikazanog na slici 2.5.



Slika 2.5: Otpornički pojačavač sa katodnim otpornikom bez premošćenja.

Za ovo kolo pojačanje iznosi:

$$Amp = \mu \cdot \frac{r_a}{r_a + r_i + (\mu+1) \cdot r_k} = \mu \cdot \frac{r_a}{r_a + r_i + \hat{u} \cdot r_k} \quad (2.7)$$

U ovoj knjizi radi kraćeg zapisa koristimo oznaku **û** umesto (μ + 1).

U ovoj jednačini r_a predstavlja paralelnu vezu anodnog otpornika R_a i otpornosti opterećenja R_{load}.

Uticaj otpornosti opterećenja je obično mali jer ona često iznosi oko 1 MΩ, dok je R_a = 100 kΩ. Kod izlaznih trioda često se koristi vrednost od oko 270 kΩ.

Premošćavanjem katodnog otpornika u jednačini (2.7) elektrolitskim kondenzatorom r_k postaje 0.

Pojačanje se tada svodi na jednačinu:

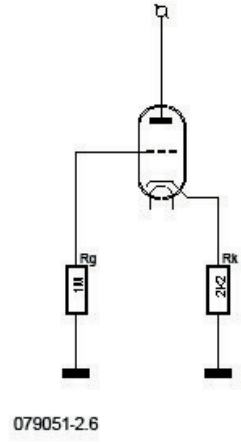
$$Amp = \mu \cdot \frac{r_a}{r_a + r_i}\text{, odnosno približno } Amp = \mu \cdot \frac{R_a}{R_a + r_i} \qquad (2.8)$$

Tipične vrednosti za ECC81 (12AT7) su μ = 60, Ra = 100 kΩ i ri = 15 kΩ. Dobija se pojačanje približno 52 puta, koje je uvek manje od μ.

2.5 Izlazna impedansa

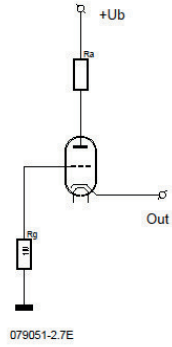
Posmatrano sa anode, izlazni otpor iznosi: $r_u = r_i + \hat{u} \cdot r_k$ (2.9).

Kada je katodni otpornik premošten, dobija se $r_u = r_i$, što odgovara zamenskom modelu triode.



Slika 2.6. Izlazni otpor posmatran sa anode.

Posmatrajući kolo sa katode (slika 2.7), dobija se AC otpornost $r_u = \frac{r_a + r_i}{\hat{u}}$ (2.10).



Slika 2.7: Izlazni otpor posmatran sa katode.

Izlazni otpor tada iznosi:

$$r_u = \frac{r_i}{\hat{u}} = \frac{r_i}{\mu + 1} \approx \frac{r_i}{\mu} = \frac{1}{S} \quad (2.11).$$

Čak i za ECC83 sa transkonduktansom od samo 1,2 mA/V dobija se vrednost manja od 1 kΩ, što je veoma mala izlazna otpornost za elektronske cevi.

2.6 Radne tačke izlaznih trioda

Za triodu u balansnom izlaznom stepenu klase A smatra se da je optimalno prilagođenje ostvareno kada je $r_a = 2 \cdot r_i$, odnosno u balansnom stepenu $r_{aa} = 4 \cdot r_i$. (2.12)

r_a i r_{aa} predstavljaju primarne impedanse izlaznog transformatora. Teorija je data u literaturi [Dieleman] i drugim detaljnim knjigama.

Sledeći odeljak zasniva se na pojednostavljenom **modelu** pogodnom za brze procene. Konačne zaključke uvek treba donositi na osnovu stvarnih karakteristika cevi. Stepen korisnog dejstva u klasi A iznosi svega oko 25 %, što predstavlja glavni nedostatak upotrebe trioda u izlaznim stepenima.

Maksimalni AC anodni napon jednak je polovini napona Uak, a maksimalna AC anodna struja jednaka je mirnoj struji Ia.

Većina konstruktora teži savršenom prilagođenju, ali ono nije uvek optimalno.

Opšti izraz za stepen korisnog dejstva glasi: $W_a = ½\ P_a \bullet (1 - 2 \cdot \frac{P_a \cdot r_i}{U_{ak}^{\ 2}})$ (2.13)

Ova jednačina je relativno malo poznata. Predstavlja disipaciju na triodi.

Jednačina (2.12) predstavlja poseban slučaj jednačine (2.13).

Teorijski maksimalni stepen korisnog dejstva triode može dostići 50 %, kao i kod pentode, što je suprotno tvrdnjama koje se često mogu naći u literaturi. To se postiže velikim anodnim naponom Uak i triodom sa malim unutrašnjim otporom ri. Paralelno povezivanje dve triode ne poboljšava situaciju, jer se disipacija udvostručuje, pa proizvod $P_a \cdot r_i$ ostaje isti.

Potrebna je trioda koja konstrukciono ima mali ri.

$$v_i = \frac{3 \cdot U_{ak}}{4\ \mu} \tag{2.14}$$

Za EL84 (6BQ5), pri Uak = 250 V i μ = 19, dobija se vi ≈ 10 Vvr. Za EL34 pri istom anodnom naponu i μ ≈ 10 dobija se približno 19 Vvr.

Katodni otpornik optimalno prilagođenog stepena iznosi:

$$R_k = 3 / S \tag{2.15}$$

Za EL84 dobija se približno 270 Ω.

Model je pojednostavljen; u praksi se često sreće odnos $r_a = 3 \cdot r_i$.

2.7 Stepen korisnog dejstva

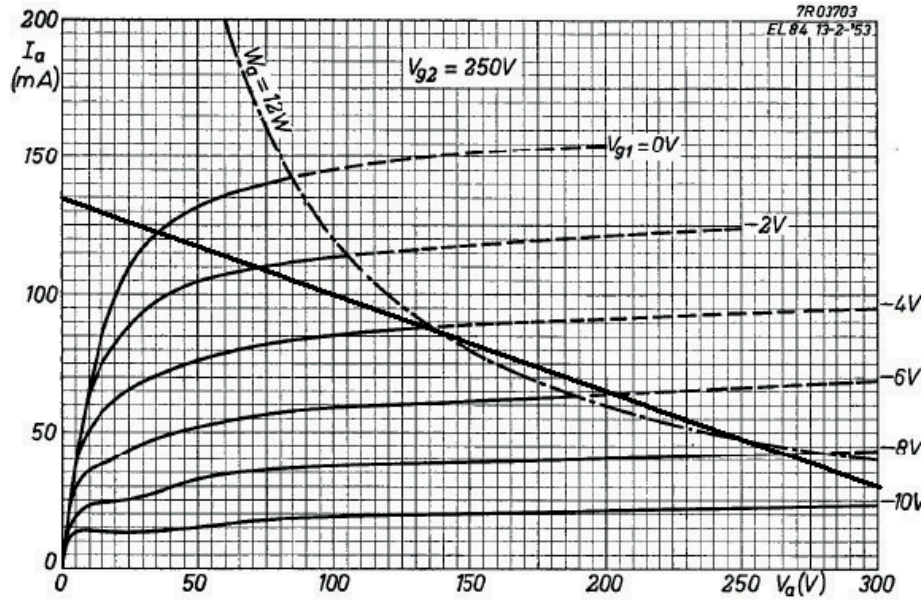
Izlazni stepen preuzima energiju iz izvora napajanja, ali samo mali deo dospeva do zvučnika, dok se ostatak pretvara u toplotu u elektronskim cevima. Stepen korisnog dejstva zavisi od klase rada (A, B ili AB) i od toga da li se koristi trioda ili pentoda.

U literaturi [Dieleman] izvedeni su kompletni proračuni, dok su ovde dati samo najvažniji rezultati.

2.7.1 Pentoda u klasi A

Počinjemo sa pentodom, zato što je to najlakše.

Najpre posmatramo stvarne karakteristike pentode EL84. Pogledajte godinu u gornjem desnom uglu; možda je starija od vas.



Slika 2.8: Pentoda EL84

Obratite pažnju da hiperbola disipacije nosi oznaku W_a. U ovoj knjizi disipacija ima oznaku W_a, dok se izlazna snaga ka zvučnicima naziva P_a.

Sa karakteristikama kao na slici 2.8 proračun efikasnosti ne može da se uradi. Zbog toga ih idealizujemo i dobijamo model prikazan ispod.