

Ing. TIHOMIL JELAKOVIĆ

NEGATIVNA REAKCIJA

U TONFREKVENTNOJ TEHNICI

IZDALA RADIOSTANICA ZAGREB

Zagreb 1957

Predgovor

Od konstruktora i praktičara često se može čuti mišljenje, kako postoji jaz između prakse i teorije. Koliko god ovu tvrdnju samu po sebi ne možemo smatrati točnom, ipak ima nešto u vezi s ovim, o čemu vrijedi povesti računa. Ako se već, naime, može govoriti o jazu, onda on postoji između teorije, kakva je potrebna za rad u praksi, i teorije, kakva se može naći u literaturi.

Tehničke knjige i članci u časopisima najčešće su pisani na kompliciran način, obično s obilnom primjenom matematike, tako da je potrebno uložiti mnogo truda i potrošiti mnogo vremena, da bi se izdvojilo ono, što je za praksu interesantno i važno. U ovom pogledu ni teorija negativne reakcije nije izuzetak. Praktičar se u većini slučajeva nalazi u situaciji, da neki posao mora izvršiti što brže, te nema vremena da se posveti studiju takve literature. Odatle gore spomenuto negodovanje prema teoriji.

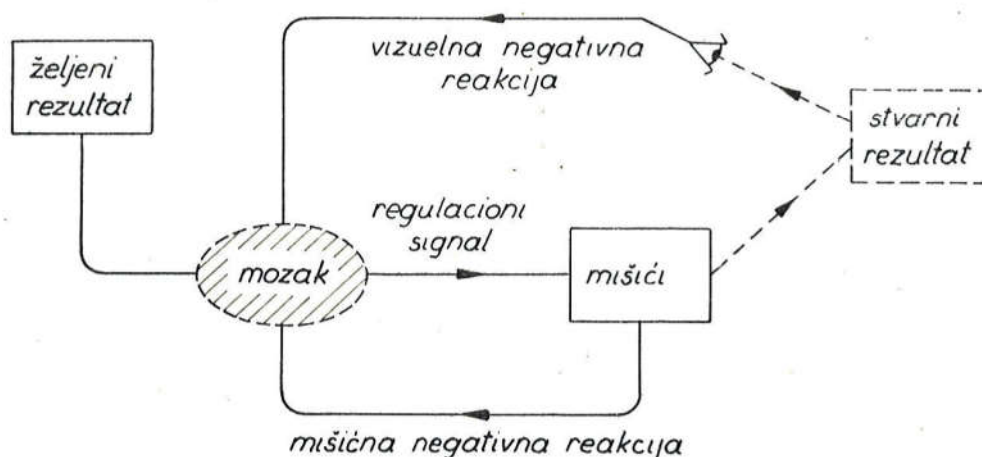
Ova knjiga predstavlja pokušaj, da se problematika negativne reakcije izloži što jednostavnije, i da se daje teorija priređena za tehničku praksu. Neki pojmovi obrađeni su na više načina, kako bi se osvijetljavanjem s više strana dobila jasnija slika problema, o kojem se radi. Matematski izvodi su izbjegavani, i nastojalo se da se do rezultata dođe logičkim zaključivanjem, kako se ne bi izgubila fizikalna nit procesa, koji se u dotičnom sklopu zbiva. Često je posebno naglašeno ono, na što u konstrukciji treba pripaziti, da ne bi došlo do neželjenih iznenađenja. Naročita pažnja je posvećena izboru primjera. Ovi primjeri, zajedno s opisom sagrađenih pojačala, omogućuju da se dobije opći uvid u primjenu negativne reakcije u tonfrekventnoj tehnici.

T. J.

UVOD

Princip negativne reakcije je opći princip, koji nije našao primjenu samo u elektronici. Danas se negativna reakcija primjenjuje u svim granama tehnike. Priroda je negativnu reakciju primijenila kod svih složenijih živih bića.

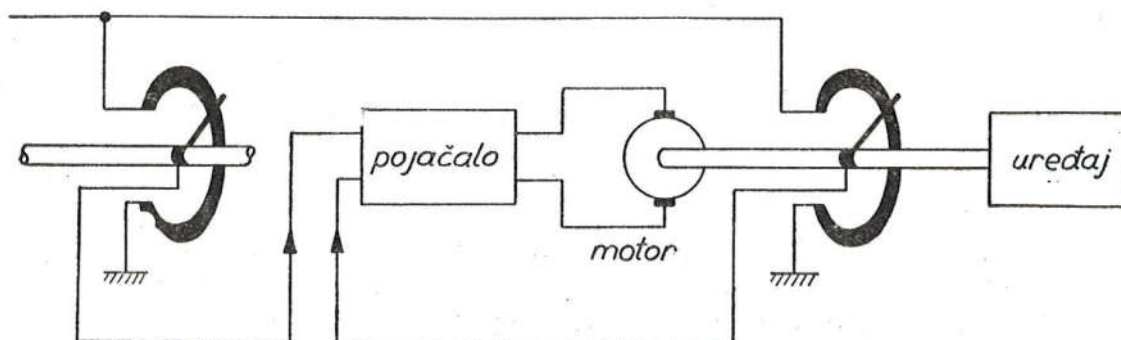
Fiziološka negativna reakcija. — Mozak i živčani sistem živih bića ne bi mogli ni izdaleka tako savršeno upravljati pokretima organa, kad bi se radilo samo o slanju uputa mišićima. Kod složenih bića primijenjen je sistem regulacije, koji je potpuno sličan onome, što se danas primjenjuje u tehnici. Kad mozak hoće da neki organ izvrši neku radnju (željeni rezultat), počne davati signale mišićima. O svojim pokretima mišići neprestano obavještavaju



mozak (mišićna negativna reakcija), koji pri tome uspoređuje dobiveni rezultat sa željenim rezultatom. Dokle god između ovih rezultata postoji razlika, mozak djeluje na mišiće, kako bi razliku sveo na najmanju mjeru ili je sasvim poništio. Ova prirodna negativna reakcija može da bude hotimična (kao na primjer u slučaju, kad želimo nešto rukom pomaknuti), ili nehotična (kao što je na primjer prilagođivanje zjenice jakosti svijetla), koje postajemo svjesni tek onda, kad njezino djelovanje izostane.

Automatska regulacija pomoću servomehanizama. — U nekoliko posljednjih desetaka godina našla je negativna reakcija u tehnici obilnu primjenu, i to u automatskoj regulaciji pomoću servomehanizama. Ovakvi uređaji vrše danas najrazličitije radnje. Na primjer: zamjenjuju pilota u upravljanju avionom, drže konstantnom temperaturu prostorija, slijede teleskopom kre-

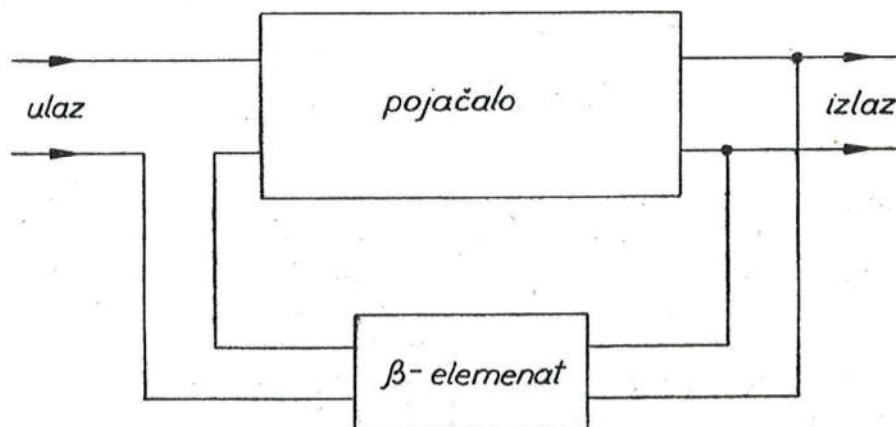
tanje zvijezde, i t. d. Na slici je shematski prikazan jedan tipičan servomehanizam, koji služi za reguliranje položaja. Opterećenje predstavlja uređaj sa stanovitom inercijom. Ovaj uređaj treba zaokrenuti za kut, za koji se zaokrene ulazna osovina. Vezivanje na istu osovину ne dolazi u obzir, jer se reguliranje



kuta vrši iz daljine. Zakretanje uređaja vrši se pomoću motora reguliranog jednim pojačalom. Čitav sistem radi tako, da se kutovi zakreta ulazne i izlazne osovine uspoređuju, a pogreška između njih dolazi na ulaz pojačala. Motoru je dan takav smjer okretanja, da se kut pogreške smanjuje.

Osnivači teorije negativne reakcije. — U elektronici je negativna reakcija mnogo mlađa od pojačala. Tek g. 1928. je *Black* pokazao, kakva svojstva ima pojačalo s reakcijom, koja je suprotna onoj tada već dobro poznatoj, što povećava pojačanje. Kad je učinio negativnu reakciju dovoljno jakom, *Black* je našao, da pojačalo kao cjelina dobiva svojstva koja ima reakciona grana. Gubitak na pojačanju, koji uzrokuje negativna reakcija, bilo je onda već moguće nadoknaditi, jer su se počele proizvoditi elektronke s velikim pojačanjem.

U svom eksperimentalnom radu s negativnom reakcijom *Black* se je susreo s problemom oscilacija i paradoksnim slučajem uvjetne stabilnosti. Ovim problemima potaknut na istraživanje *Nyquist* je teorijskim putem došao do svog kriterija stabilnosti. (*Nyquist*-ov patent g. 1930.)



Poznavanje kriterija stabilnosti nije dovoljno, da bi se moglo prići konstrukciji pojačala s negativnom reakcijom, koje ne bi osciliralo. Pravila za takvu konstrukciju dao je *Bode* (*Bode*-ov patent g. 1937.). Osim ovih pravila *Bode* je našao, koje su praktičke granice za primjenu negativne reakcije. U

svojim radovima Bode je također pokazao, da se primjenom negativne reakcije ne gubi samo na pojačanju, nego i na tome, što se mora kontrolirati vrlo širok pojas frekvencija.

Korist od primjene negativne reakcije kod pojačala. — Primijeniti negativnu reakciju kod pojačala znači jedan dio izlaznog napona, određen β -elementom, privesti u protufazi na ulaz. Pri tome se pojačalu kao cjelini promijene svojstva. U poredbi s pojačalom bez negativne reakcije pojačalo s negativnom reakcijom (uz stanovite uvjete) ima:

1. manje pojačanje,
2. manje prigušno izobličenje,
3. manje harmoničko izobličenje,
4. manje fazno izobličenje,
5. manje napone smetnji,
6. manju, odnosno veću (po želji, odnosno potrebi) ulaznu ili izlaznu impedanciju,
7. veću konstantnost pojačanja.

Jedino prva točka predstavlja nedostatak, no koji se uz današnje moderne elektronke može lako kompenzirati. Ostala svojstva predstavljaju čisti dobitak i s ekonomskog gledišta, jer primjena negativne reakcije omogućuje da se sagradi, na primjer, tonfrekventno pojačalo s boljim svojstvima uz nižu cijenu.

GLAVA PRVA

SVOJSTVA ELEKTRONKE U NEGATIVNOJ REAKCIJI

1. Elektronka u reakciji

1. Pozitivna i negativna reakcija. — Elektronka se često upotrebljava u sklopu, u kojem se jedan dio napona iz anodnog kruga dovodi signalnoj rešetki. Svako vraćanje napona (ili općenito: vraćanje energije) iz anodnog kruga u krug rešetke naziva se *reakcijom*. Pri tome mogu postojati dva slučaja: Prvo, da je vraćeni izmjenični napon u fazi s naponom signala, tako da se ovi naponi zbrajaju. Takvoj reakciji je ime *pozitivna reakcija*. Drugo, da su ovi naponi protufazni, jedan se od drugoga odbija. Ovakva reakcija se naziva *negativnom reakcijom*. Nas će, barem u početku, zanimati samo ova posljednja vrsta reakcije, te ćemo se njome opširno pozabaviti.

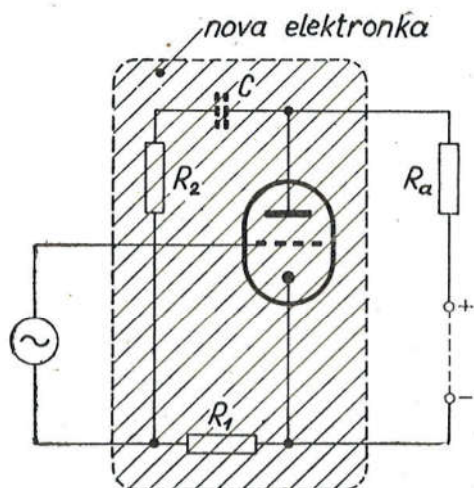
2. Elektronka u negativnoj reakciji. — Izmjenični napon se iz anodnog kruga elektronke može u protufazi dovesti u rešetkin krug u principu na tri načina: 1. da se napon rešetki dovede s anode; 2. da se napon za rešetku uzme s katodnog otpornika; 3. da se kombiniraju oba načina istodobno. Promotrimo redom svaki od ova tri načina posebno.

Prvi način prikazuje shema na sl. 1. Pomoću djelitelja napona, koji čine otpornici R_1 i R_2 , dijeli se anodni napon na dva dijela. Onaj dio napona, koji vlada na otporniku R_1 , dolazi u rešetkin krug. Ako nas zanima samo vraćanje izmjenične komponente anodnog napona u krug rešetke, tada ćemo pomoću kondenzatora C spriječiti, da na rešetku dođe istosmjerna komponenta anodnog napona.

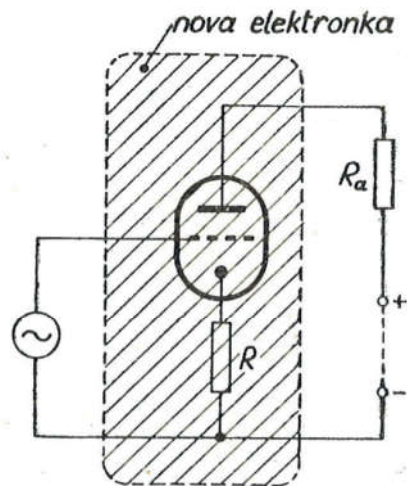
Drugi način vraćanja napona iz anodnog kruga u krug rešetke jednostavniji je. U ovom slučaju treba samo ukloniti kondenzator, koji obično premošćava katodni otpornik. U ovakvom sklopu ne samo istosmjerna komponenta napona s otpornika R na sl. 2. — prednapon — nego i izmjenična, djeluje u rešetkinom krugu.

O trećem načinu nije potrebno govoriti posebno, jer se radi o primjeni oba gore opisana načina zajedno, kao što prikazuje sl. 3.

3. Naponska i strujna negativna reakcija. — U sklopu na sl. 1. je izmjenični napon, koji se dobiva na otporu R_1 , razmjeran izmjeničnoj komponenti *napona* na opterećenom otporu R_a . Zato je ova negativna reakcija dobila ime *naponska negativna reakcija*.

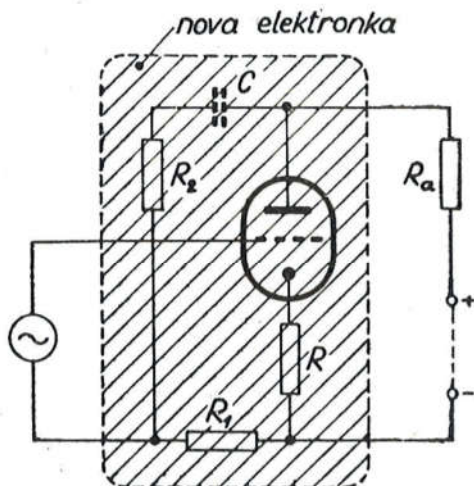


Sl. 1. Elektronka u naponskoj negativnoj reakciji.



Sl. 2. Elektronka u strujnoj negativnoj reakciji.

Na katodnom otporu R na sl. 2. nastaje napon, čija je vrijednost proporcionalna izmjeničnoj komponenti *struje*, koja teče kroz opterećni otpor R_a . Po tome se ova vrsta negativne reakcije naziva *strujnom negativnom reakcijom*.



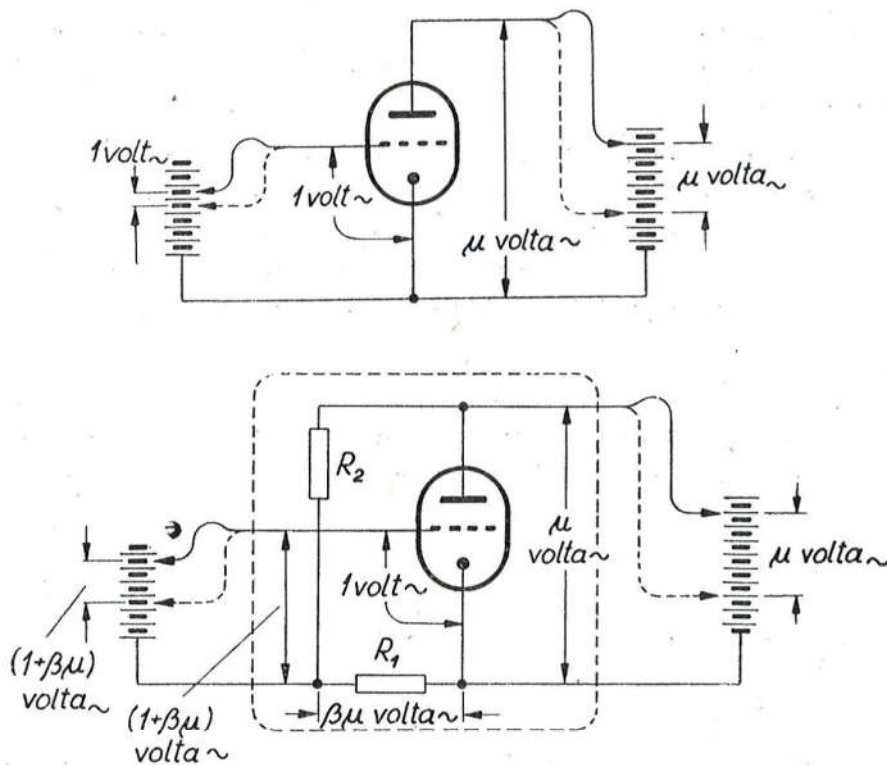
Sl. 3. Elektronka istodobno u naponskoj i strujnoj negativnoj reakciji.

Upozorenje: Budući da ćemo izraz »negativna reakcija« upotrebljavati vrlo često, to će biti praktično, da ne ispisujemo cijeli izraz, nego da upotrebljavamo kraticu »NR«, što ćemo ubuduće u tekstu redovito činiti.

2. Karakteristične veličine elektronke u negativnoj reakciji

Elektronka u NR dobiva prividno¹ drugačija svojstva, nego što ih ima bez NR. Karakteristične veličine elektronke — faktor pojačanja, strmina i unutarnji otpor — poprimaju drugačije vrijednosti, ovisno o vrsti NR. U slijedećim recima proučit ćemo, zašto do tih promjena dolazi.

1. μ , S i R_i kod elektronke u naponskoj negativnoj reakciji. — Prema definiciji je faktor pojačanja μ odnos između promjene anodnog napona i promjene napona rešetke, uz konstantnu anodnu struju. Pogledajmo, što će se dogoditi, ako negativni napon rešetke povišimo za 1 volt (sl. 4.). Anodna struja će se smanjiti za stanoviti iznos. Da bismo struju doveli na prijašnju vrijednost, bilo bi u slučaju bez NR potrebno anodni napon povećati za μ volta. Budući da je kod elektronke u NR preko djelitelja napona s anodom spojena i rešetka, to će se promjenom anodnog napona promijeniti i napon rešetke.



Sl. 4. Faktor pojačanja elektronke u naponskoj NR prividno je manji nego bez NR. Znakom izmjeničnog napona naznačeno je, da se radi o promjenama napona.

Promjena napona anode prispjet će na rešetku umanjena u odnosu $R_1/(R_1 + R_2)$. Ovaj ćemo odnos, koji je, kao što vidimo, uvijek manji od 1, označiti sa β . Promjena napona anode za μ volta izazvat će, dakle, na rešetki promjenu napona od $\beta\mu$ volta. Negativni napon rešetke time će se smanjiti i struja će se povećati. Da bismo struju ponovo vratili na početnu vrijednost (koju je ona

¹ Nove karakteristike ima sklop, to jest elektronka u NR, dok se karakteristike same elektronke ne mijenjaju. Radi se, dakle, samo o prividnim promjenama svojstava elektronke.

imala nakon promjene od 1 volta), treba negativni napon rešetke povećati za još $\beta\mu$ volta, to jest povećati na $(1 + \beta\mu)$ volta. Evo, do kakvog nas zaključka ovo dovodi: dok je bez NR odnos između promjene anodnog napona i promjene napona rešetke bio μ volta prema 1 voltu, sa NR je postao μ volta prema $(1 + \beta\mu)$ volta. Ovaj posljednji odnos je manji, jer je nazivnik veći. Prema tome *faktor pojačanja elektronke u naponskoj NR je $(1 + \beta\mu)$ puta manji od faktora pojačanja iste elektronke bez NR:*

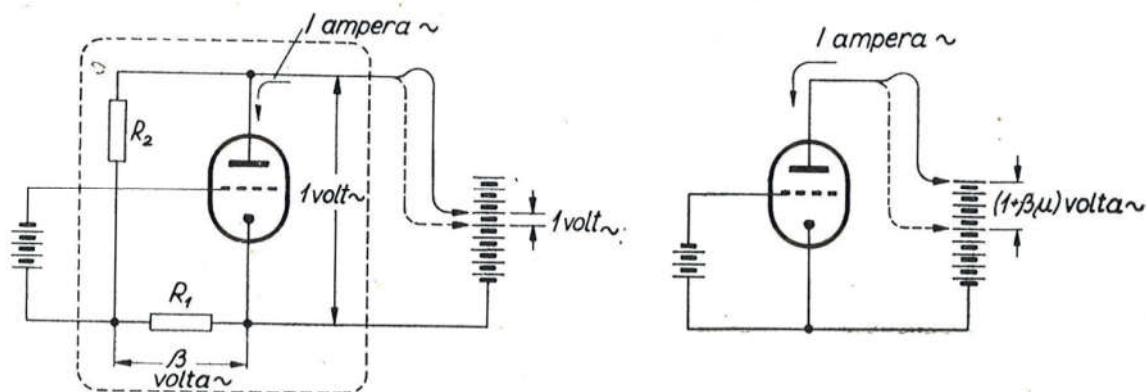
$$\mu' = \frac{\mu}{1 + \beta\mu} \quad (1)$$

Ovdje moramo na nešto upozoriti! Naponom rešetke nazivamo napon između rešetke i katode. U našem slučaju to ime nosi promjena napona od 1 volta. No promjena napona od $(1 + \beta\mu)$ volta ne djeluje između rešetke i katode, nego između rešetke i gornjeg kraja otpornika R_1 . Zato ovo zapravo nije promjena napona rešetke, kako smo je gore nazvali. Budući da se nalazi na ulazu u sklop, zvat ćemo ubuduće ovu promjenu napona: *promjena ulaznog napona*.

Strmina S definirana je kao odnos između promjene anodne struje i promjene napona rešetke, uz konstantan anodni napon. Kako je kod naponske NR reakcioni napon ovisan o promjeni anodnog napona, to ga u ovom slučaju ne će biti, jer anodni napon mora ostati konstantan. *Strmina elektronke u naponskoj NR, će dakle, ostati ista kao da NR nema:*

$$S' = S \quad (2)$$

Unutarnji otpor elektronke R_i je prema definiciji odnos između promjene anodnog napona i time izazvane promjene anodne struje, uz konstantan pred-



Sl. 5. Unutarnji otpor elektronke u naponskoj NR prividno je manji nego bez NR.

napon rešetke. Promijenimo napon anode — na primjer, povećajmo ga — za 1 volt (sl. 5.). Time će se napon rešetke promijeniti za β volta. Svaka od ovih promjena posebno povećavat će anodnu struju, jer su obje promjene istog

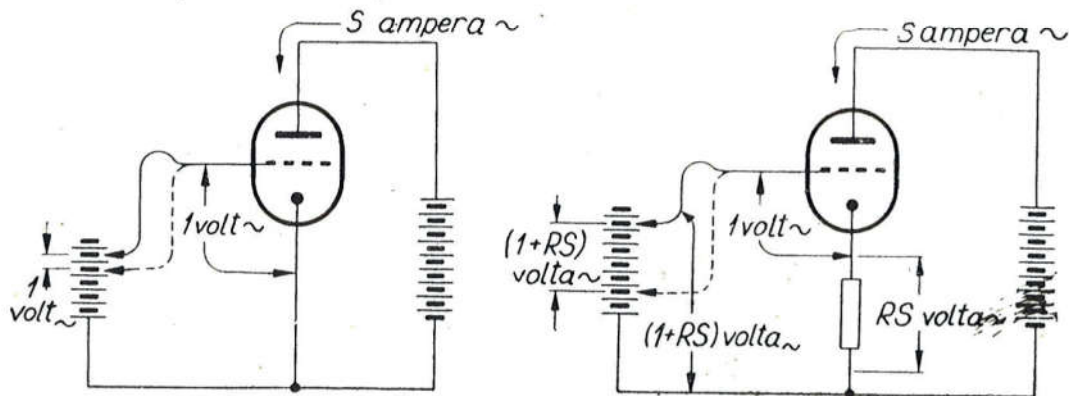
predznaka.¹ Prema definiciji unutarnjeg otpora napon rešetke mora ostati nepromijenjen. No promjenu napona rešetke moguće je uvijek izraziti kao μ puta veću promjenu napona na anodi. Prema tome će se u našem slučaju anodna struja povećati tako, kao da se anodni napon povećao za $(1 + \beta\mu)$ volta, a da se pri tome napon rešetke nije promijenio. Možemo također uzeti, da povećanje anodne struje nije uslijedilo zbog povećane promjene anodnog napona sa 1 volta na $(1 + \beta\mu)$ volta, nego zbog toga, što je unutarnji otpor elektronke postao $(1 + \beta\mu)$ puta manji. Dakle: kad je elektronka u naponskoj NR, smanji joj se unutarnji otpor $(1 + \beta\mu)$ puta:

$$R_i' = \frac{R_i}{1 + \beta\mu} \quad (3)$$

2. μ , S i R_i kod elektronke u strujnoj negativnoj reakciji. — Kod mjerenja faktora pojačanja treba anodni napon i napon rešetke tako promijeniti, da anodna struja ostane nepromijenjena. No u tom slučaju nema ni promjene napona na otporu R , pa prema tome nema ni reakcionog napona. Iz toga slijedi, da kod elektronke u strujnoj NR faktor pojačanja ostaje isti, kao bez NR:

$$\mu' = \mu \quad (4)$$

Da vidimo, što se događa sa strminom! Promjena napona na rešetki od 1 volta izaziva uz konstantan napon na anodi promjenu struje od S ampera (sl. 6.), jer je strmina prema definiciji promjena anodne struje u amperima po



Sl. 6. Strmina elektronke u strujnoj NR prividno je manja, nego bez NR.

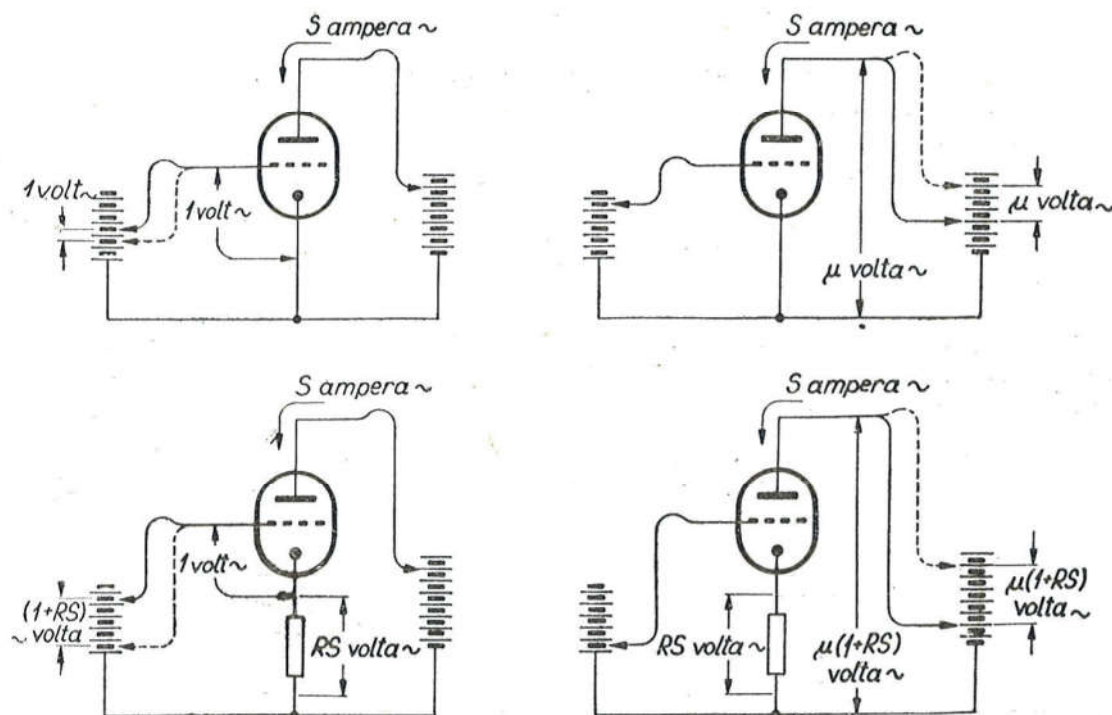
voltu promjene napona rešetke. Uslijed ove promjene struje pojavljuje se na otporu R promjena napona od RS volta. Zbog toga, što je promjena napona na rešetki protivnog smisla prema promjeni napona nastaloj na otporu R , potrebno je na ulazu izvršiti promjenu napona od $(1 + RS)$ volta, pa da opet na rešetki djeluje promjena napona od 1 volta, a u anodnom krugu da se struja

¹ Iz ovoga bi u prvi čas slijedilo, da se radi o pozitivnoj reakciji, jer obje promjene napona djeluju u istom smislu, povećavaju anodnu struju. No kad elektronka radi kao pojačalo, dakle s otporom u anodnom krugu, onda povećanje anodne struje, uzrokovano promjenom napona rešetke u pozitivnom smislu, izaziva povećanje pada napona na anodnom otporu, i time smanjena napona na anodi. Ove su promjene napona međusobno protivnog smisla, iz čega slijedi, da se elektronka u ovačkom sklopu nalazi u negativnoj reakciji.

promijeni za S ampera. Kako je sada za istu promjenu struje potrebno na ulaz privesti veću promjenu napona, to izlazi, da se je *strmina smanjila*, i to onoliko puta, koliko puta se je promjena ulaznog napona povećala:

$$S' = \frac{S}{1 + RS} \quad (5)$$

Strujna NR uzrokuje također promjenu unutarnjeg otpora elektronke. U kojoj mjeri, vidjet ćemo iz slijedećeg izlaganja: U slučaju bez NR promjena anodnog napona za μ volta djeluje na anodnu struju isto tako, kao promjena napona rešetke za 1 volt (sl. 7.). U oba slučaja struja se promijeni za



Sl. 7. Unutarnji otpor elektronke u strujnoj NR prividno je veći nego bez NR.

S ampera. Primjenom NR odnosi se mijenjaju. Zbog promjene pada napona na otporu R potrebno je, da bi se dobila ista promjena struje, ulazni napon povećati na $(1 + RS)$ volta. Prije je (u slučaju bez otpora R) promjenu struje od S ampera uzrokovala promjena napona na rešetki od 1 volta, odnosno promjena napona od μ volta na anodi, a sada za tu istu promjenu struje treba na ulazu izvršiti promjenu od $(1 + RS)$ volta, odnosno na anodi promjenu od $\mu(1 + RS)$ volta (μ i μ' su međusobno jednaki). Povećanu promjenu anodnog napona morali smo privesti zato, što se povećao unutarnji otpor, i to u istoj mjeri, u kojoj je trebalo povećati promjenu napona:

$$R_i' = R_i (1 + RS) \quad (6)$$

Faktorom strujne reakcije a zove se odnos između reakcionog napona i struje, koja je reakcioni napon izazvala. Uz promjenu napona na rešetki od 1 volta imamo, da je a jednako kvocijentu RS/S , odakle dobivamo, da je $a = R$. Ako još uzmemo u pomoć dobro poznatu jednadžbu, prema kojoj je odnos

$R_i \cdot S/\mu$ jednak jedinici, onda unutarnji otpor elektronke u strujnoj NR možemo i ovako izraziti:

$$R_i' = R_i + a\mu \quad (7)$$

3. μ , S i R_i kod elektronke u naponsko-strujnoj negativnoj reakciji. — Uslijed naponske NR unutarnji otpor elektronke se prividno smanji $(1 + \beta\mu)$ puta, a uslijed strujne NR poveća $(1 + RS)$ puta. Prema tome će unutarnji otpor elektronke uz primjenu obiju NR biti:

$$R_i' = R_i \frac{1 + RS}{1 + \beta\mu} \quad (8)$$

odnosno:

$$R_i = \frac{R_i' + a\mu}{1 + \beta\mu} \quad (9)$$

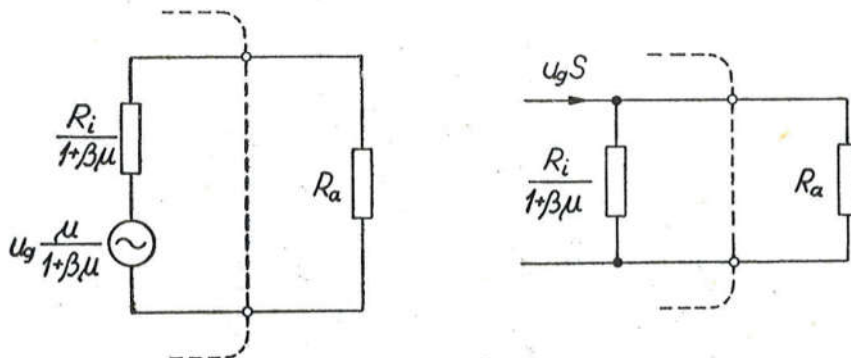
Kao što smo vidjeli, strmina se kod naponske NR ne mijenja. Prema tome će na strminu kod kombinirane NR utjecati samo strujna NR.

Obrnuto je kod faktora pojačanja. Na faktor pojačanja utječe samo naponska NR, tako da će kod kombinirane NR faktor pojačanja biti određen jedino naponskom NR.

Slijedeća tabela daje pregledno, kakve vrijednosti prividno poprimaju karakteristične veličine elektronke u NR, ovisno o vrsti NR:

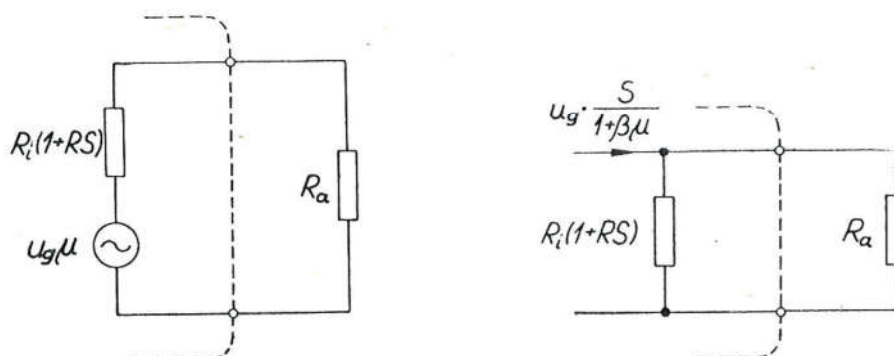
Naponska NR	$\mu' = \frac{\mu}{1 + \beta\mu}$	$S' = S$	$R_i' = \frac{R_i}{1 + \beta\mu}$
Strujna NR	$\mu' = \mu$	$S' = \frac{S}{1 + RS}$	$R_i' = R_i (1 + RS)$
Naponsko-strujna NR	$\mu' = \frac{\mu}{1 + \beta\mu}$	$S' = \frac{S}{1 + RS}$	$R_i' = R_i \frac{1 + RS}{1 + \beta\mu}$

4. Nadomjesne sheme elektronke u negativnoj reakciji. — Sada raspolažemo sa svim podacima, koji su potrebni da nacrtamo nadomjesne sheme elektronke u NR kao izvora izmjeničnog napona i struje. Sl. 8. prikazuje na-



Sl. 8. Nadomjesne sheme elektronke u naponskoj NR.

domjesne sheme, kad je elektronka u naponskoj NR, dok sheme na sl. 9. vrijede za strujnu NR. Sa u_g smo na shemama označili izmjenični napon na ulazu, koji treba elektronkom pojačati.



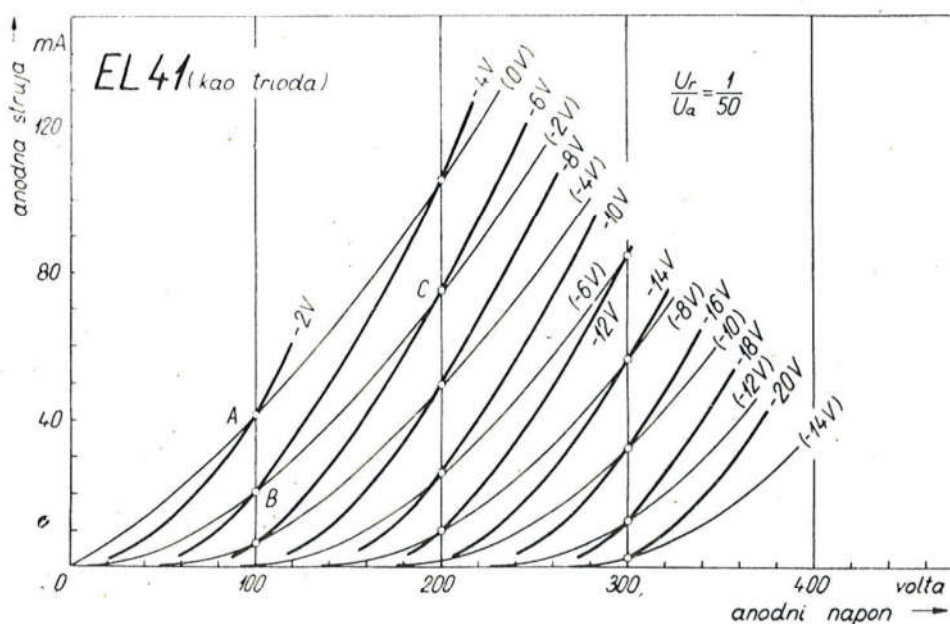
Sl. 9. Nadomjesne sheme elektronke u strujnoj NR.

3. Konstrukcija anodnih karakteristika elektronke u negativnoj reakciji

Svojstva neke elektronke najbolje se mogu vidjeti iz njezinih karakterističnih krivulja. Za proračunavanje pojačala najprikladnije su anodne karakteristike. Ove se karakteristike elektronke u NR mogu na relativno jednostavan način konstruirati iz karakteristika, koje elektronka ima bez NR.

1. Anodne karakteristike elektronke u naponskoj negativnoj reakciji. —

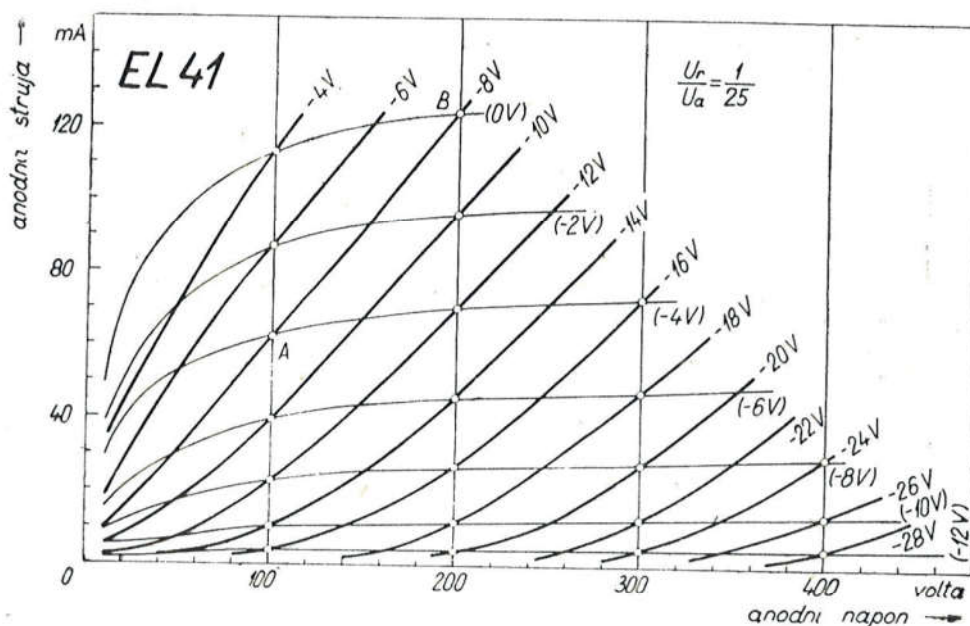
Da bismo mogli prići konstruiranju novih karakteristika iz poznatih karakteristika, treba kod naponske NR poznavati faktor β . Svaka promjena anodnog napona pojavljuje se na rešetki β puta umanjena, te se za toliko napon rešetke razlikuje od ulaznog napona. Postupak konstrukcije razjasnit ćemo na konkretnim primjerima.



Sl. 10. Karakteristike elektronke EL 41, spojene kao triode, u naponskoj NR s faktorom $\beta = 1/50$.

Na sl. 10. prikazane su tankim linijama anodne karakteristike pentode EL 41, kad je ona spojena kao trioda. Neka se elektronka nalazi u naponskoj NR, a na rešetku neka se vraća napon, koji iznosi pedeseti dio anodnog napona ($\beta = 1/50$). Da dobijemo pojedine točke, koje će pripadati novim krivuljama, povisivat ćemo anodni napon za jednake iznose, na primjer, za 100 volta. Vertikale povučene kroz stotice anodnog napona sijeku karakteristike elektronke u točkama, koje istodobno pripadaju i novim karakteristikama. Preostaje nam samo da odredimo, kojem ulaznom naponu odgovaraju pojedine točke.

Počnimo s anodnim naponom od 100 volta. Reakcioni napon iznosi u ovom slučaju $100/50 = 2$ volta. Točka A na sl. 10. leži na karakteristici, koja pripada naponu rešetke od 0 volta. Da bismo na rešetki dobili napon od 0 volta, kad je elektronka u naponskoj NR, potrebno je pozitivni reakcioni napon od 2 volta kompenzirati s isto tolikim negativnim ulaznim naponom. Prema tome točka A pripada ulaznom naponu od -2 volta. Točka B leži na karakteristici napona rešetke od -2 volta. Budući da reakcioni napon iznosi $+2$ volta, to ćemo morati privesti ulazni napon od -4 volta, pa da na rešetki dobijemo -2 volta. Iz toga slijedi, da točka B pripada ulaznom naponu od -4 volta.



Sl. 11. Karakteristike pentode EL 41 u naponskoj NR s faktorom $\beta = 1/25$.

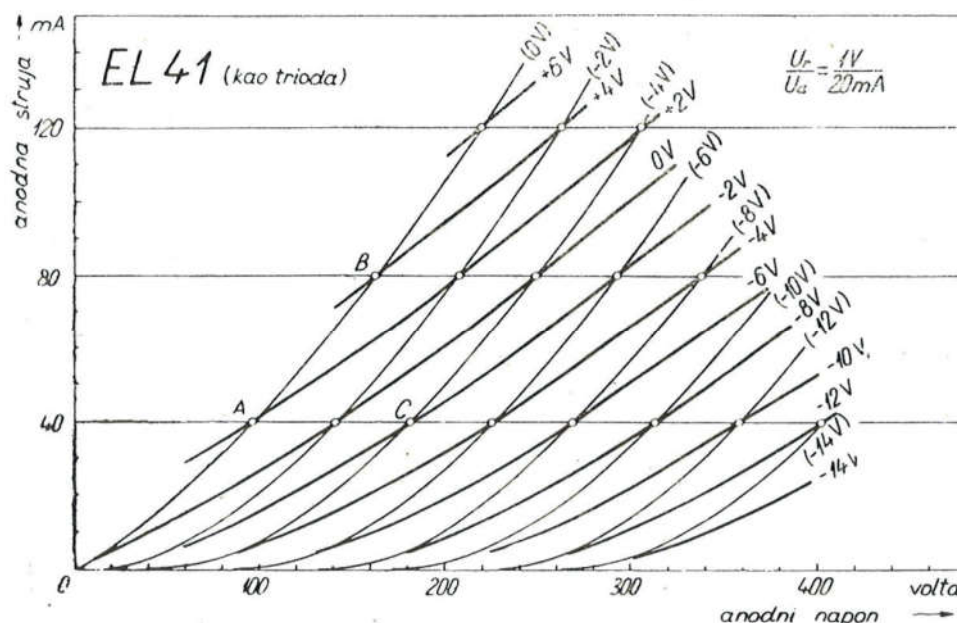
Točka C nalazi se također na karakteristici napona rešetke od -2 volta, ali na vertikali, koja pripada anodnom naponu od 200 volta. Ovdje je vrijednost reakcionog napona $200/50 = 4$ volta, te je na ulaz potrebno privesti napon od -6 volta, kako bi na rešetki ostao njezin prijašnji napon od -2 volta. Ulazni napon dobije se, dakle, tako da se reakcionom naponu, koji je kod naponske NR uvijek pozitivan, promijeni predznak, i doda mu se dotični napon rešetke. Spajanjem točaka istog ulaznog napona dobivaju se karakteristike elektronke u NR.

Na isti način konstruirane su na sl. 11. karakteristike elektronke EL 41 kao pentode, kad se ona nalazi u naponskoj NR s faktorom $\beta = 1/25$. Rezo-

nirajući na isti način dobivamo da točka A, koja leži na karakteristici napona rešetke od -4 volta, pripada karakteristici ulaznog napona od -8 volta. Točka B pripada anodnom naponu od 200 volta. Prema tome će reakcioni napon iznositi $200/25 = 8$ volta. Da se dobije 0 volta na rešetki potrebno je privesti ulazni napon od -8 volta.

2. Anodne karakteristike elektronke u strujnoj negativnoj reakciji. — Kod strujne NR reakcioni napon je proporcionalan anodnoj struji, te ćemo stoga konstrukciju novih krivulja zasnivati na povećavanju struje za jednake iznose. Horizontale povučene iz ovih vrijednosti anodne struje sjeći će karakteristike elektronke u tačkama, koje će ujedno biti i tačke novih krivulja. Produkt struje i otpora dat će reakcioni napon. I ovdje ćemo konstrukciju objasniti na primjeru.

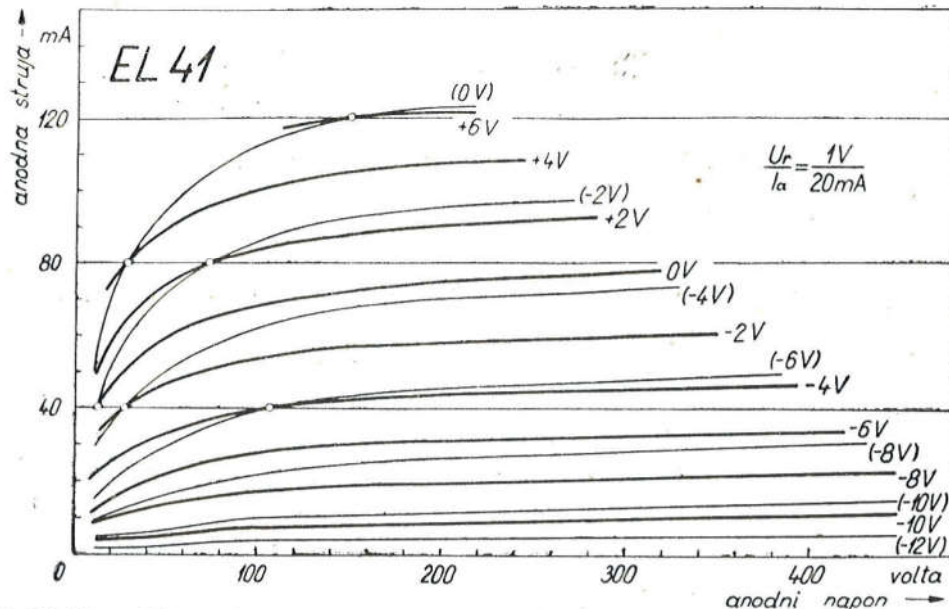
Preko anodnih karakteristika elektronke EL 41 u triodnom spoju na sl. 12. povučene su horizontale u vrijednostima anodne struje od 40, 80 i 120



Sl. 12. Karakteristike elektronke EL 41, spojene kao triode, u strujnoj NR s faktorom $\alpha = 50$ V/A.

miliampera. Katodni otpor neka ima vrijednost od 50 oma, tako da će kod povećanja struje za 20 miliampera = 0,02 ampera povećanje napona na otporu iznositi 1 volt. U točki A, koja pripada karakteristici napona rešetke od 0 volta, struja ima vrijednost od 40 miliampera, pa će, dakle, napon na otporu iznositi 2 volta. Da bismo na rešetki dobili napon od 0 volta, potrebno je privesti ulazni napon također od 2 volta, ali po smjeru suprotan naponu na otporu. Gledano s katode napon na otporu ima negativan predznak, što znači, da ulazni napon mora imati pozitivan predznak. Prema tome točka A pripada novoj karakteristici ulaznog napona od $+2$ volta. U točki B struja ima vrijednost 80 miliampera, pa će napon na otporu iznositi -4 volta. Da bismo na rešetki dobili 0 volta, ulazni napon treba da ima vrijednost $+4$ volta. U točki C je, kao i u točki A, vrijednost anodne struje 40 miliampera;

dakle, napon na otporu R iznosi -2 volta. Da bi se na rešetki dobilo -4 volta, jer točka C leži na karakteristici napona rešetke od -4 volta, treba na ulazi dovesti -2 volta. Ulazni napon se, dakle, i ovdje dobiva na isti način, kao i kod naponske NR: *reakcionom naponu, koji je kod strujne NR uvijek negativan, promijeni se predznak, i doda mu se napon rešetke*. Točke istog ulaznog napona se međusobno spoje, i tako dobiju nove karakteristike.



Sl. 13. Karakteristike pentode EL 41 u strujnoj NR s faktorom $\alpha = 50$ V/A.

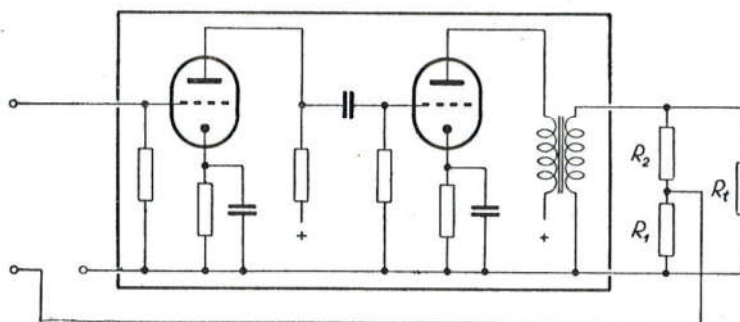
Na sl. 13. konstruirane su karakteristike elektronke EL 41 kao pentode, kad je ona u strujnoj NR, s otporom u katodi od 50 oma.

GLAVA DRUGA

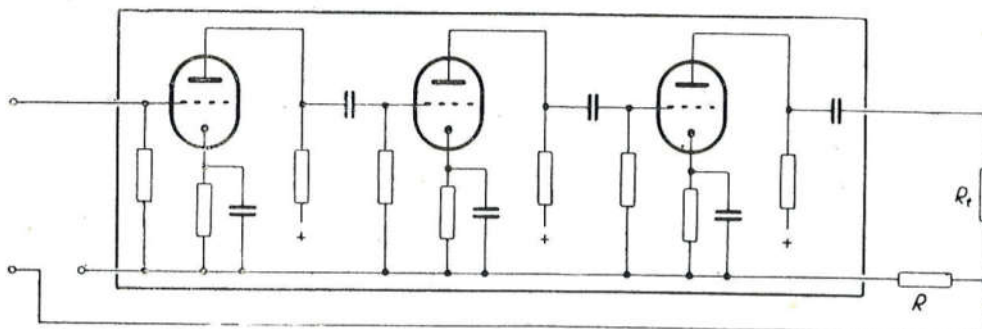
OSNOVNA SVOJSTVA POJAČALA U NEGATIVNOJ REAKCIJI

1. Pojačalo u negativnoj reakciji

1. U petlju negativne reakcije može se uključiti više stupnjeva pojačala.
— Dosada smo promatrali slučajeve, kad je samo jedna elektronka bila u NR. No u petlju NR može biti uključeno i više elektronki. Na sl. 14. vidimo sklop, u kojem se u NR nalaze dvije elektronke. Na sekundaru izlaznog trans-



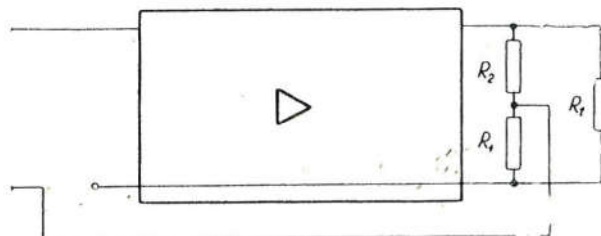
Sl. 14. Dvostepeno pojačalo u naponskoj NR.



Sl. 15. Trostepeno pojačalo u strujnoj NR.

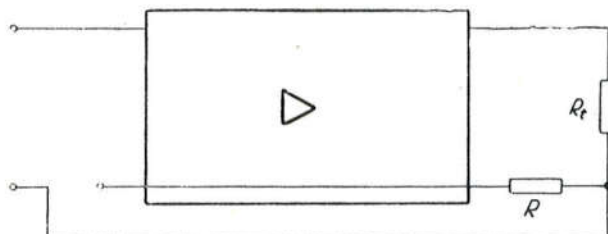
formatora, paralelno opterećenom otporu, priključen je djelitelj napona, s kojeg se jedan dio izlaznog napona dovodi na ulaz pojačala. Sl. 15. prikazuje shemu pojačala s tri stupnja u NR. Ovdje se reakcioni napon uzima s otpora, koji je opterećenom otporu spojen u seriju, i preko sva tri stupnja privodi rešetki

prve elektronke. U principu nema posebnog razloga, da se petljom NR ne obuhvati i više od tri stupnja pojačala. No to se obično ne čini, jer tada nastupaju poteškoće, koje uvelike otežavaju, pa i onemogućuju, praktičku izvedbu. O tome ćemo kasnije govoriti opširnije.



Sl. 16. Blok-shema pojačala u naponskoj NR.

2. Pojačalo kao cjelina u negativnoj reakciji. — U ovom odsjeku proučit ćemo općenita svojstva pojačala, kod kojeg je primijenjena NR. Zato ćemo pojačalo, bez obzira na broj stupnjeva obuhvaćenih NR-om, smatrati



Sl. 17. Blok-shema pojačala u strujnoj NR.

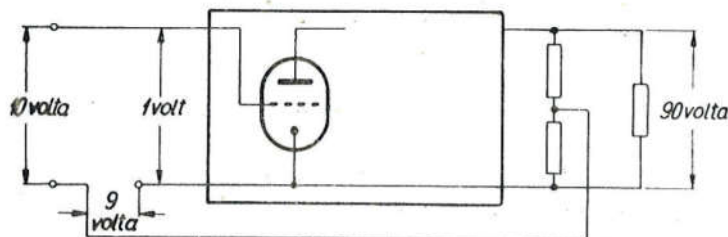
jednom cjelinom. Shemu tako gledanog pojačala u naponskoj NR vidimo na sl. 16. Reakcioni napon dobiva se kao dio izlaznog napona s djelitelja napona, koji čine otpori R_1 i R_2 . Ako se radi o strujnoj NR, onda se reakcioni napon uzima s otpora R , koji je opteretnom otporu R_f spojen u seriju, kao na sl. 17.

2. Negativna reakcija smanjuje pojačanje pojačala

1. Izlazni napon konstantan, ulazni napon promjenljiv. — Kad se mjerenjem uspoređuju pojačanja dvaju pojačala, obično se to izvodi tako, da se na ulaze pojačala dovodi isti izmjenični napon, a iz različitih izlaznih napona koji se pri tome dobiju, vidi se razlika u pojačanju. No može se postupiti i obrnuto: ako se jedan od ulaznih napona mijenja, dotle, dok izlazni naponi kod oba pojačala ne budu jednaki, onda se iz razlike ulaznih napona vidi razlika u pojačanju. Kod proučavanja svojstava pojačala u NR često je prikladnije primijeniti ovaj drugi način. Ako se, naime, postupi na prvi način — držeći ulazni napon konstantnim — onda promjena izlaznog napona povlači za sobom i promjenu reakcionog napona, te moramo imati u vidu dvije promjenljive veličine. Naprotiv, ako je izlazni napon konstantan, tada je konstantan i reakcioni napon, te svoju pažnju treba da usmjerimo samo na promjenu jedne veličine, to jest na promjenu ulaznog napona.

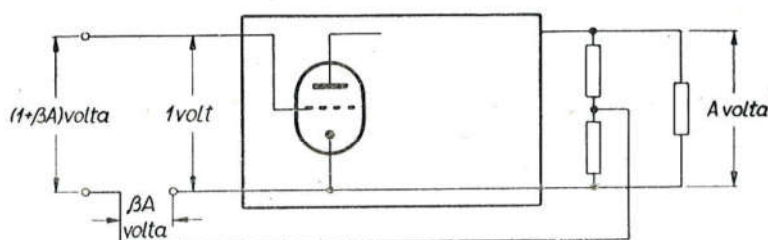
2. Napon na rešetki i ulazni napon. — Kod pojačala treba razlikovati dva ulazna napona: ulazni napon pojačala bez NR i ulazni napon pojačala u NR, koji je od onog prvog veći za reakcioni napon. Kad nam bude potrebno, da posebno razlikujemo ova dva napona, onda ćemo onaj prvi, u pomanjkanju boljih izraza, nazivati *naponom na rešetki*, a onaj drugi *ulaznim naponom*.¹

3. Pojačanje pojačala uz primjenu naponske negativne reakcije. — Kao što smo to učinili prije, tako ćemo i sada na rešetku (prve elektronke) pojačala privesti napon od 1 volta (sl. 18.). Ako pojačalo pojačava, na primjer,



Sl. 18. Napon na ulaznoj rešetki od 1 volta i reakcioni napon od 9 volta daju ulazni napon od 10 volta. Pojačanje se, dakle, smanjilo 10 puta.

90 puta, na izlazu ćemo dobiti 90 volta. Neka faktor β bude $1/10$, što znači, da se deseti dio izlaznog napona u protufazi vraća na ulaz. Budući da smo se dogovorili, da ćemo izlazni napon održavati konstantnim, to će sada biti potrebno, da ulazni napon promijenimo. Na ulaz moramo dovesti toliki napon, da on nadvlada reakcioni napon, i još stvori prijašnji napon na rešetki. U našem slučaju ulazni napon iznositi će $(1 + 9) = 10$ volta. Umjesto prijašnjeg napona od 1 volta sada treba za dobivanje istog izlaznog napona privesti na ulaz 10 volta. Pojačanje pojačala smanjilo se, dakle, deset puta. Ili sasvim općenito (sl. 19.): Ako pojačalo pojačava A puta, onda će 1 volt na rešetki



Sl. 19. Napon na rešetki od 1 volta i reakcioni napon od βA volta daju ulazni napon od $(1 + \beta A)$ volta. Pojačanje se dakle smanjilo $(1 + \beta A)$ puta.

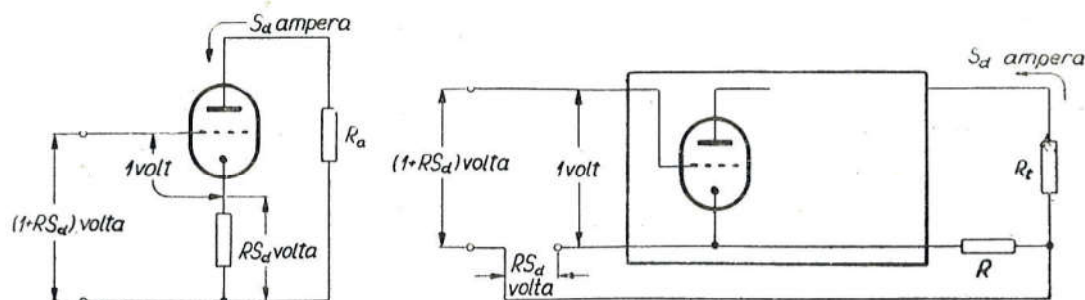
prve elektronke pojačala dati A volta na izlazu. Vratimo li β -ti dio izlaznog napona u protufazi na ulaz, dakle βA volta, tada će ulazni napon morati iznositi $(1 + \beta A)$ volta, da bi se na izlazu dobilo prijašnjih A volta. Pojačanje

¹ Katkad se »napon na rešetki« naziva »unutarnjim ulaznim naponom«, a »ulazni napon« »vanjskim ulaznim naponom«.

pojačala smanjilo se $(1 + \beta A)$ puta. Označimo li pojačanje pojačala u NR sa A' , možemo pisati:

$$A' = \frac{A}{1 + \beta A} \quad (10)$$

4. Pojačanje pojačala uz primjenu strujne negativne reakcije. — Kod strujne NR pojačanje pojačala ovisi o veličini reakcionog otpora i dinamičkoj strmini. S otporom u anodnom krugu elektronka, odnosno pojačalo, ima manju



Sl. 20. Kod strujne NR napon na rešetki od 1 volta i reakcioni napon od RS_d volta daju ulazni napon od $(1 + RS_d)$ volta. Pojačanje se smanjilo $(1 + RS_d)$ puta.

strminu, nego bez otpora. Ova strmina dobivena pod radnim ili dinamičkim uvjetima zove se *dinamička strmina*, a označit ćemo je sa S_d . Kao što se vidi iz sl. 20., pojačanje pojačala u strujnoj NR smanji se na vrijednost:

$$A' = \frac{A}{1 + RS_d} \quad (11)$$

Ova formula vrijedi uz uvjet, da je anodni otpor R_a , odnosno opterećni otpor pojačala R_t , mnogo veći od reakcionog otpora R . Obrazloženje za ovaj uvjet dat ćemo malo kasnije. Ako se radi o pojačalu s više stupnjeva unutar petlje strujne NR, dinamičku strminu predstavlja izmjenična struja, koja teče kroz opterećni otpor, kad na rešetki ulazne elektronke djeluje izmjenični napon od 1 volta.

Formula (10), koju smo dobili za naponsku NR, vrijedi uz stanovite uvjete i za strujnu NR. Razjasnit ćemo, što kod strujne NR znači faktor β . Kod naponske NR definirali smo faktor β kao odnos otpora $R_1/(R_1 + R_2)$. Kao što se vidi, faktor β je ustvari odnos reakcionog napona prema izlaznom naponu. Ista definicija može se preuzeti i za strujnu NR. Ako je, naime, opterećni otpor R_t na sl. 17. mnogo veći od reakcionog otpora R , kao što je to normalno slučaj, onda je napon na otporu R_t (izlazni napon) gotovo jednak naponu A , te se može primijeniti gornja definicija.

Još ćemo naći, kakav odnos postoji između α i β . Faktor α naznačuje odnos između reakcionog napona i struje, koja teče kroz opterećni otpor R_t :

$$\alpha = \frac{\beta A}{S_d} \quad (12)$$

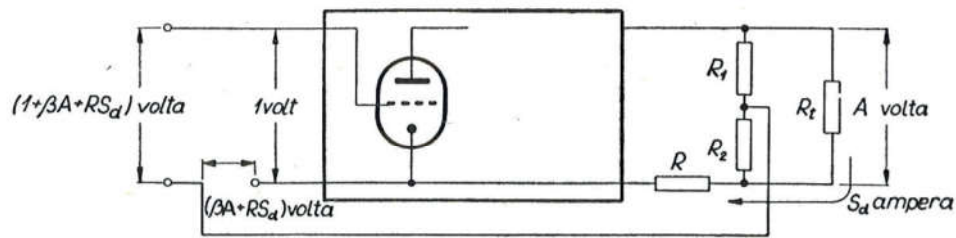
Uz gore spomenutu pretpostavku, na napon A vlada praktički i na otporu R_t , izlazi da je:

$$\alpha = \beta R_t \quad (13)$$

odnosno:

$$\beta = \frac{\alpha}{R_t} \quad (14)$$

5. Pojačanje pojačala uz primjenu naponsko-strujne negativne reakcije. — Ako u istoj petlji djeluju obje vrste NR, kao u shemi na sl. 21., onda ulazni



Sl. 21. Kod naponsko-strujne NR napon na rešetki od 1 volta i reakcioni napon od $(\beta A + RS_d)$ volta daju ulazni napon od $(1 + \beta A + RS_d)$ volta. Pojačanje se smanjilo $(1 + \beta A + RS_d)$ puta.

napon treba da svlada oba reakciona napona, i još treba da stvori napon na rešetki. Prema tome će pojačanje pojačala uz kombiniranu NR pasti na vrijednost:

$$A' = \frac{A}{1 + \beta A + RS_d} \quad (15)$$

Ako nazivniku u ovoj formuli dodamo i oduzmemo jedinicu, dobivamo (u nazivniku) izraze, koje smo imali u formulama za pojačanje uz naponsku NR i strujnu NR:

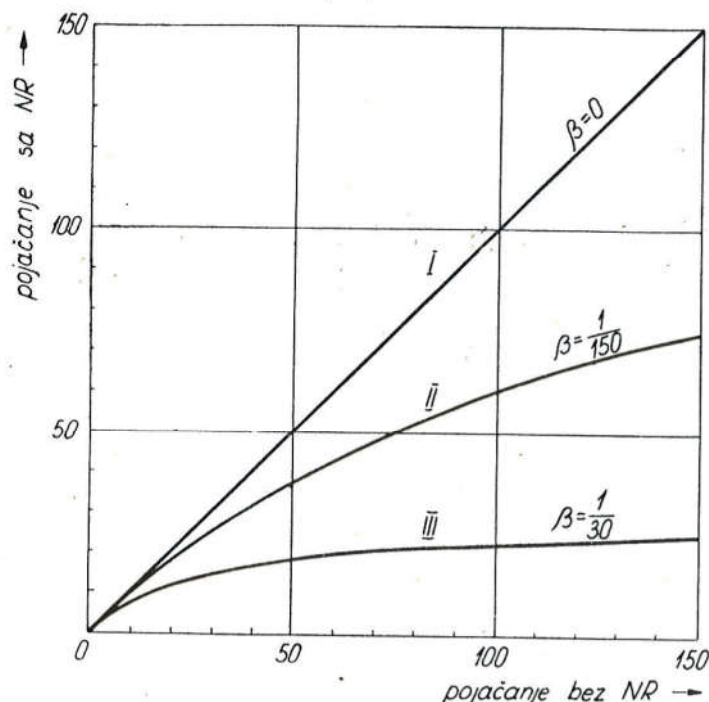
$$A' = \frac{A}{(1 + \beta A) + (1 + RS_d) - 1} \quad (16)$$

Iz formule se vidi, da se pojačanje uz primjenu obje NR smanji onoliko puta, koliko iznosi zbroj smanjenja pojačanja od jedne i druge NR umanjen za jedinicu.

6. Faktor reakcije. Dijagram pojačanja uz primjenu negativne reakcije. — Iz formule (10) se vidi, da će smanjenje pojačanja uslijed NR biti to veće, što je veće pojačanje pojačala A , i što je veći faktor β , dakle, što je veći faktor reakcije βA . Drugim riječima: što je reakcioni napon veći prema naponu na rešetki pojačala, to je smanjenje pojačanja veće.

Ovisnost pojačanja sa NR o pojačanju bez NR, i to za razne faktore β , prikazana je pomoću dijagrama na sl. 22. Pravac I samo je pomoćni pravac, koji prikazuje slučaj, kada je $A' = A$. Uz faktor $\beta = 1/150$ dobiva se pomoću formule (10) krivulja II. Ova krivulja se kod malih pojačanja neznatno udaljuje od pravca I, što znači, da u pojačanju nema velike razlike, bila primijenjena NR ili ne. No kasnije, kod većih pojačanja, krivulja je sve položitija,

iz čega slijedi, da je razlika između A' i A sve veća. To naročito vrijedi za krivulju *III*, za koju je faktor $\beta = 1/30$.



Sl. 22. Ovisnost pojaćanja kod pojaćala u NR o pojaćanju bez NR uz razne faktore β .

7. Uz veliki faktor reakcije postaje pojaćanje s negativnom reakcijom neovisno o pojaćanju bez negativne reakcije. — Povećavanjem faktora β kod nekog pojaćala postaje reakcioni napon sve veći prema naponu na rešetki, tako da ulazni napon postaje po veličini sve bliži reakcionom naponu. Ako je faktor β vrlo velik, ulazni napon postaje približno jednak reakcionom naponu. U tom slučaju pojaćanje pojaćala u NR praktički više ne ovisi o pojaćanju, koje pojaćalo ima bez NR, već samo o faktoru β . To se vidi i iz formule (10). Kad je βA vrlo veliko prema 1, onda 1 možemo zanemariti te imamo:

$$A' \approx \frac{A}{\beta A} = \frac{1}{\beta} \quad (17)$$

Ovo, što nam kaže formula (17), možemo vidjeti i iz krivulje *III*, na sl. 22. Iznad pojaćanja od nekih 50 puta krivulja je gotovo horizontalna, iz čega slijedi, da otprilike od tog pojaćanja nadalje pojaćanje pojaćala u NR ostaje praktički konstantno.

Uzmimo primjer: pojaćanje A nekog pojaćala neka je 100, a faktor β neka bude $1/2$. Prema formuli (10) pojaćanje sa NR iznosi:

$$A' = \frac{100}{1 + 1/2 \cdot 100} = 1,96$$

a prema formuli (17):

$$A' = \frac{1}{1/2} = 2$$

Pogreška, dakle, kod izračunavanja s približnom formulom u ovom slučaju iznosi samo 2%. To ujedno znači, da samo 2% od ulaznog napona otpada na napon rešetke, a 98% na reakcioni napon.

8. Stupanj negativne reakcije i decibeli. — S izrazom $(1 + \beta A)$, koji nam naznačuje, koliko puta se smanji pojačanje pojačala, susretat ćemo se ubuduće vrlo često. Radi jednostavnosti zamijenit ćemo ovaj izraz sa p , a nazvat ćemo ga *stupnjem negativne reakcije*, ili *faktorom smanjenja pojačanja*. Tako će formula (10) poprimiti oblik:

$$A' = \frac{A}{p} \quad (18)$$

Označimo li faktor smanjenja pojačanja kod naponske NR sa p_u , a kod strujne sa p_i , onda formulu (16) možemo napisati ovako:

$$A' = \frac{A}{p_u + p_i - 1} = \frac{A}{p_{ui}} \quad (19)$$

Iz ovih formula slijedi:

$$p = \frac{A}{A'} \quad (20)$$

odnosno:

$$p_{ui} = \frac{A}{A'} \quad (20a)$$

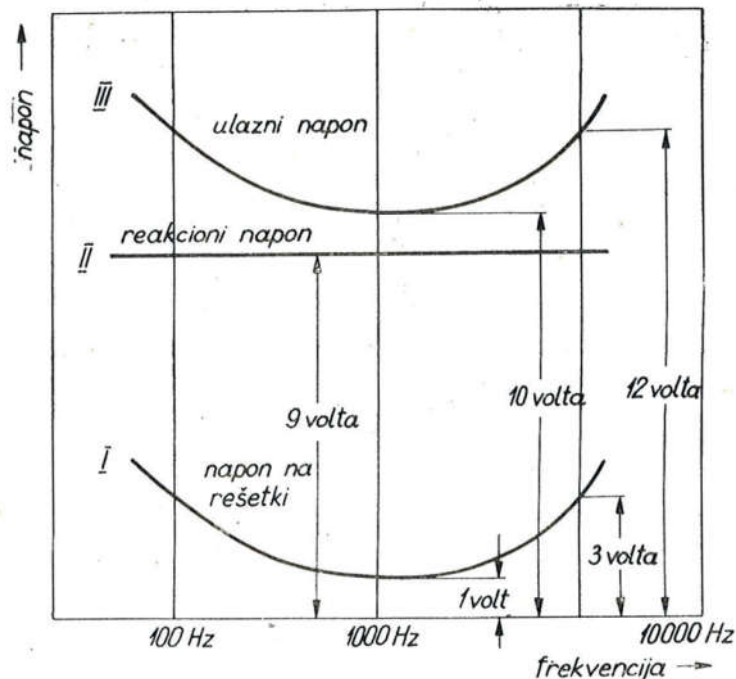
Stupanj NR p naznačuje, koliko puta je pojačanje sa NR manje od pojačanja bez NR, ili — što je isto — koliko puta je pojačanje bez NR veće od pojačanja sa NR. Radi se, dakle, o odnosu jednog pojačanja prema drugom. Iz praktičkih razloga je prikladno, da se odnosi izražavaju u decibelima, kao što se to u dojavnoj tehnici najčešće čini. Na kraju knjige nalazi se tablica, iz koje se može naći, koliko decibela odgovara pojedinim odnosima. Tako, na primjer, ako se kaže, da NR iznosi 20 decibela ($p = 20$ db), onda to znači, da se primjenom NR pojačanje dotičnog pojačala smanji 10 puta.

3. Negativna reakcija smanjuje prigušno izobličenje

Kao što smo vidjeli u prethodnom poglavlju, faktor smanjenja pojačanja ovisi osim o faktoru β također i o pojačanju A . Uz konstantan faktor β bit će faktor smanjenja pojačanja p to manji, što je pojačanje A manje, i obrnuto. Već iz ovoga možemo zaključiti, da će NR ublaživati razlike u pojačanju kod nekog pojačala. To će nam još kasnije pokazati dijagrami u razmatranjima, koja slijede.

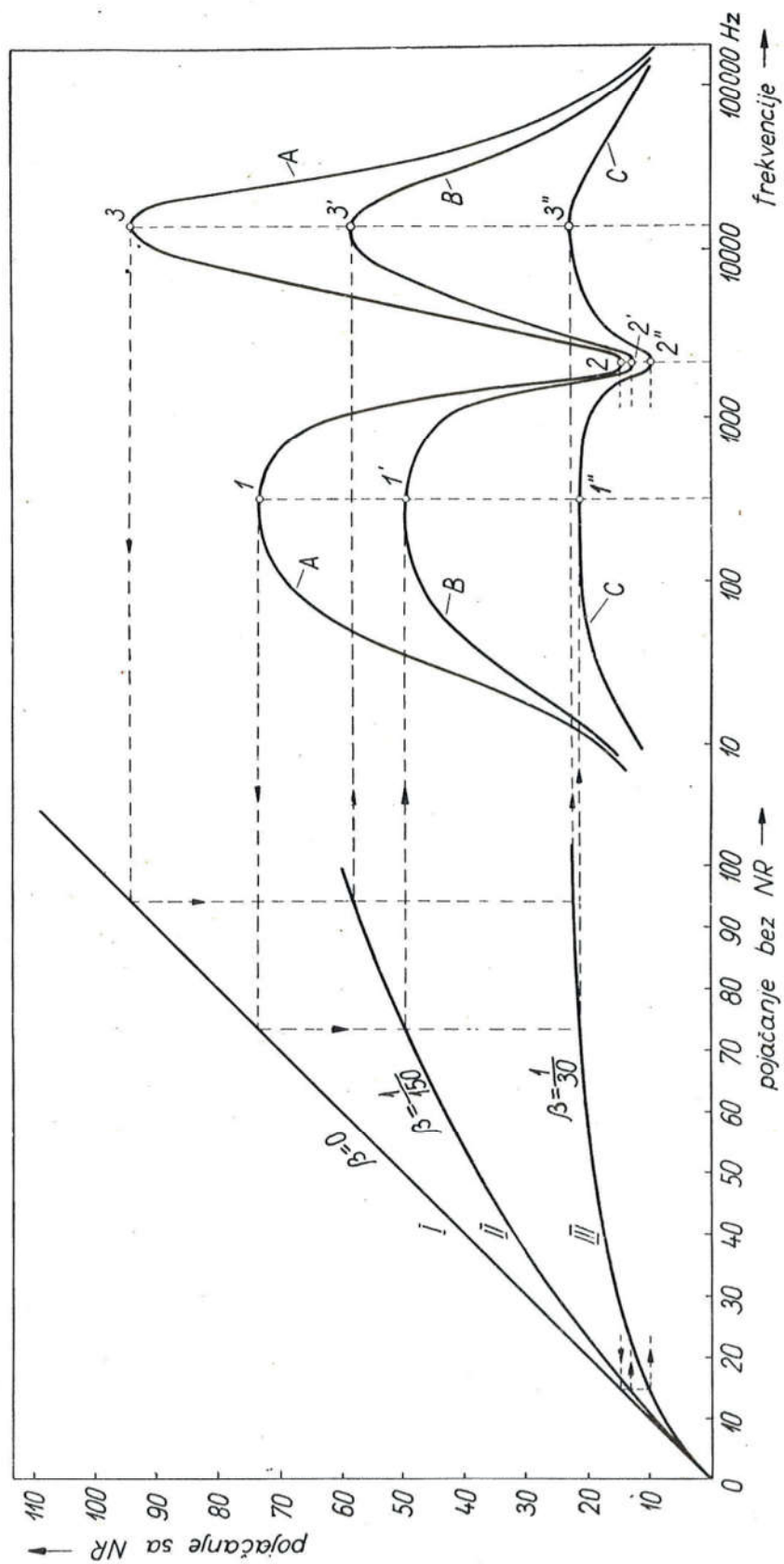
1. Prigušna karakteristika ulaznog napona i negativna reakcija. — Prigušna karakteristika pojačala obično prikazuje ovisnost izlaznog napona o frekvenciji, uz uvjet, da je ulazni napon konstantan. Nama će i ovdje biti prikladnije, da izlazni napon držimo konstantnim, pa će nam ovisnost napona na rešetki (prve elektronke) o frekvenciji prikazivati prigušno izobličenje pojačala. U sasvim općenitom slučaju takva karakteristika ima oblik krivulje I na

sl. 23. Iz ove karakteristike se vidi, da prema najnižim i najvišim frekvencijama ulazni napon raste, što znači, da napone tih frekvencija pojačalo slabije pojačava. Dodajmo sada naponu na rešetki reakcioni napon! Budući da je izlazni napon kod svih frekvencija stalan, to će isto biti i s reakcionim naponom, tako da će frekventna karakteristika reakcionog napona biti horizontala *II*. Zbroj napona na rešetki i reakcionog napona daje napon na ulazu pojačala. Frekventnu karakteristiku ulaznog napona prikazuje karakteristika *III*. Uspoređivanjem karakteristike *I* i *III* možemo vidjeti, što smo dobili pomoću NR.



Sl. 23. Prigušno izobličenje pojačala u NR (krivulja *III*) manje je, nego bez NR (krivulja *I*), jer su relativne razlike u pojačanju napona raznih frekvencija manje.

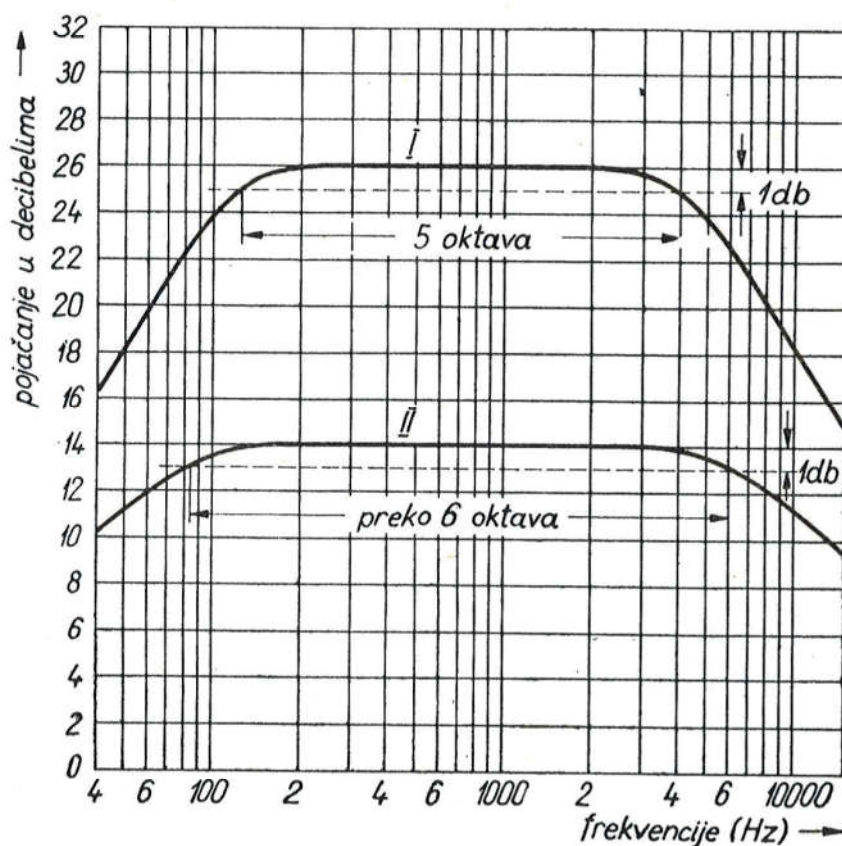
Iz karakteristike *I* se vidi, da kod 1000 Hz napon na rešetki iznosi 1 volt. Isto tako se vidi, da je kod 10.000 Hz potrebno na rešetku dovesti 3 volta, dakle 3 puta ili za 200% veći napon, nego kod 1000 Hz. Ako reakcioni napon ima vrijednost od 9 volta, onda će ulazni napon pojačala u NR iznositi kod 1000 Hz 10 volta, što znači, da se je pojačanje uslijed NR smanjilo 10 puta. Kod 10.000 Hz novi ulazni napon iznosi 12 volta. Razlika između ulaznog napona kod 10.000 Hz i ulaznog napona kod 1000 Hz je 2 volta. No ovu razliku ne smijemo gledati u njezinom apsolutnom iznosu, već je moramo staviti u odnos prema ulaznom naponu kod 1000 Hz. Kako kod ove frekvencije ulazni napon iznosi 10 volta, to se razlika prema ovom naponu odnosi kao 2 prema 10, odnosno razlika predstavlja peti dio ili 20% ulaznog napona. Od prijašnjih 200% razlika se smanjila na 20%. Prvotno odstupanje prema novom odstupanju odnosi se kao 200 prema 20, dakle kao 10 prema 1. Zaključak: prigušno izobličenje ulaznog napona smanjuje se primjenom NR u istom omjeru, u kojem se smanjuje pojačanje. Prema tome smanjenje prigušnog izobličenja plaćeno je gubitkom na pojačanju.



Sl. 24. NR ublažava razlike u pojačanju. Pri tome u većoj mjeri utječe na »brda« na prigušnoj karakteristici, nego na »doline«. Ovdje nije uzeto u obzir fazno izobličenje pojačala.

2. Negativna reakcija djeluje u većoj mjeri na vršna pojačanja. — Dijagram na sl. 24. reći će nam još nešto više o smanjenju prigušnog izobličenja pomoću NR. U dijagramu ćemo se poslužiti krivuljama iz sl. 22. Ove će nam krivulje zajedno s pomoćnim pravcem dobro doći za konstrukciju prigušnih karakteristika, koje pojačalo dobiva primjenom NR. Neka frekventna karakteristika *izlaznog* napona jednog pojačala ima oblik prikazan krivuljom A. Kao što se vidi iz karakteristike, radi se o vrlo nejednolikom pojačanju, koje u području srednjih frekvencija varira od 15 (točka 2), pa čak do preko 90 (točka 3). Transformirajmo ovu prigušnu karakteristiku u novu karakteristiku, koja se dobije primjenom NR. To ćemo učiniti tako, da ćemo pojedine točke karakteristike A prenijeti horizontalama na lijevo do pomoćnog pravca I, s pravca vertikalama prema dolje do krivulje II, odnosno III, a s ovih krivulja opet horizontalama na desno do vertikalala, koje pripadaju dotičnoj frekvenciji. Na slici su uzete tri točke — 1, 2 i 3 — i pokazano je crtkanim linijama, kako se vrši ovakvo prenošenje.

Što nam pokazuju dobivene karakteristike? Vidimo, da su razlike u pojačanju uvelike ublažene, i to u to većoj mjeri, što je NR jača. Na karakteristici C posve je nestao lijevi i desni »brijeg« karakteristike A. No također upada u oči, da se to nije dogodilo s onim udubljenjem kod točke 2. A vidimo i zašto! Udubljenje se nalazi tako nisko, da pada u ono područje krivulja na lijevoj strani slike, gdje se one tek neznatno udaljuju od pomoćnog pravca. Kod tih pojačanja faktor slabljenja je malen, te nema bitne razlike između stanja sa NR i bez nje. Iz svega ovoga izlazi slijedeći zaključak: *Na vrhove*



Sl. 25. NR proširuje pojas prenošenih frekvencija.

prigušne karakteristike, dakle na velika pojačanja, djeluje NR u mnogo većoj mjeri nego na udubljenja karakteristike, na mala pojačanja.

3. Negativna reakcija proširuje pojas prenošenih frekvencija. — Veličina prigušnog izobličenja u najužoj je vezi sa širinom pojasa prenošenih frekvencija. U normalnom slučaju do prigušnog izobličenja u nekom pojačalu dolazi samo na krajevima prenošenog frekventnog pojasa, to jest kod najnižih i najviših frekvencija. Što ćemo smatrati širinom frekventnog pojasa, stvar je čistog dogovora. To ovisi o tome, koliki ćemo gubitak napona dopustiti kod najniže i najviše frekvencije, koju još želimo prenijeti. Kod običnih pojačala za akustičke svrhe najčešće se dopušta gubitak od 10% ili od približno 1 decibela, jer razlike u pojačanju ispod 1 decibela ne možemo uhom zamijetiti. Prema ovom kriteriju širina pojasa kod prigušne karakteristike I na sl. 25. iznosi pet oktava (od 125 do 4000 Hz). Primjenom NR od 12 decibela pojačanje se kod srednjih frekvencija smanji za isti broj decibela ili 4 puta. Do gubitka na pojačanju od 1 decibela doći će sada kod neke niže i kod neke više frekvencije nego prije (krivulja II). Pojas frekvencija se, dakle, proširio na obje strane i sada iznosi preko šest oktava (od nekih 85 pa do 6000 herca).

Još ćemo na kraju ovim našim zaključcima dati matematski oblik. Označimo li pojačanje bez NR kod jedne frekvencije sa P , a faktor smanjenja pojačanja kod te frekvencije sa p , zatim pojačanje bez NR kod neke druge frekvencije sa Q , a faktor smanjenja pojačanja sa q , onda će pojačanja uz primjenu NR biti:

$$P' = \frac{P}{p} \quad i \quad Q' = \frac{Q}{q} \quad (21)$$

Odnos pojačanja bit će:

$$\frac{P'}{Q'} = \frac{P}{Q} \cdot \frac{q}{p} \quad (22)$$

Iz ove formule se vidi, da su pojačanja uz primjenu NR bliža, što znači, da se je frekventni pojas proširio.¹

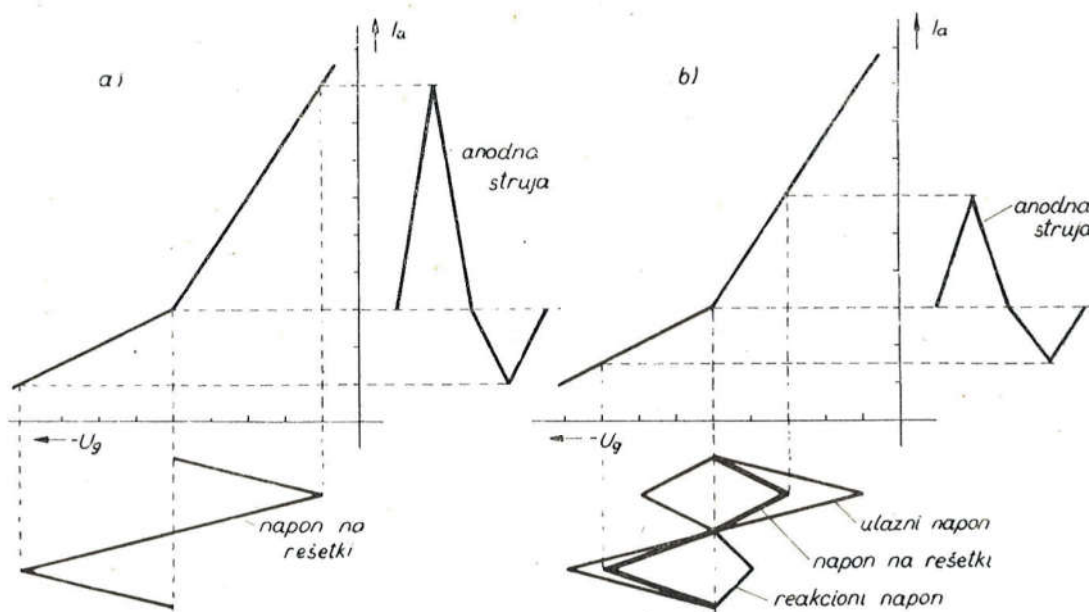
4. U pojačalo unutar petlje negativne reakcije ne smiju se uključivati filtarski sklopovi. — U pojačalo se često ugrađuju filtri, kojima je svrha da izazovu hotimično prigušno izobličenje. Ovakvi se filtri ne smiju uklapati u pojačalo unutar petlje NR, jer, kao što smo vidjeli, NR nivelira pojačanje, smanjuje prigušno izobličenje, te prema tome u većoj ili manjoj mjeri, ovisno o stupnju NR, ublaži djelovanje filtra. To ne znači, da se kod pojačala, u kojem se primjenjuje NR, ne može pomoću filtra djelovati na prigušnu karakteristiku. *No tada takve filtre treba ugrađivati ne u samo pojačalo, nego u reakciji dio petlje.* O tome će biti govora u jednom od kasnijih poglavlja.

¹ Ovo vrijedi samo za slučaj malenih faznih zakreta i slabe NR. Kod višestepenih pojačala dolazi na krajevima frekventnog pojasa do velikih faznih zakreta, što uz primjenu jače NR dovodi do pojava opisanih u glavi trećoj, te je potrebno uvrstiti korekcijske elemente, da se neželjene pojave otklone i frekventni pojas proširi.

4. Negativna reakcija smanjuje harmoničko izobličenje

Negativna reakcija je dobila naročito značenje i široku primjenu najviše zbog toga, što ona smanjuje harmoničko izobličenje.

1. Reakcioni napon izobličuje rešetkin napon. — Da bi proces smanjivanja harmoničkog izobličenja bio što pregledniji, pojednostavnit ćemo kako karakteristiku elektronke, tako i dijagram napona. Zato smo na sl. 26. radnu karakteristiku elektronke prikazali pomoću dva pravca, a slično smo učinili i s dijagramom izmjenične komponente napona na rešetki. Veličina izobličenja anodne struje vidi se iz razlike u vršnim vrijednostima pozitivnog i negativnog poluvala. Na sl. 26a pozitivni poluval je tri puta viši od nega-



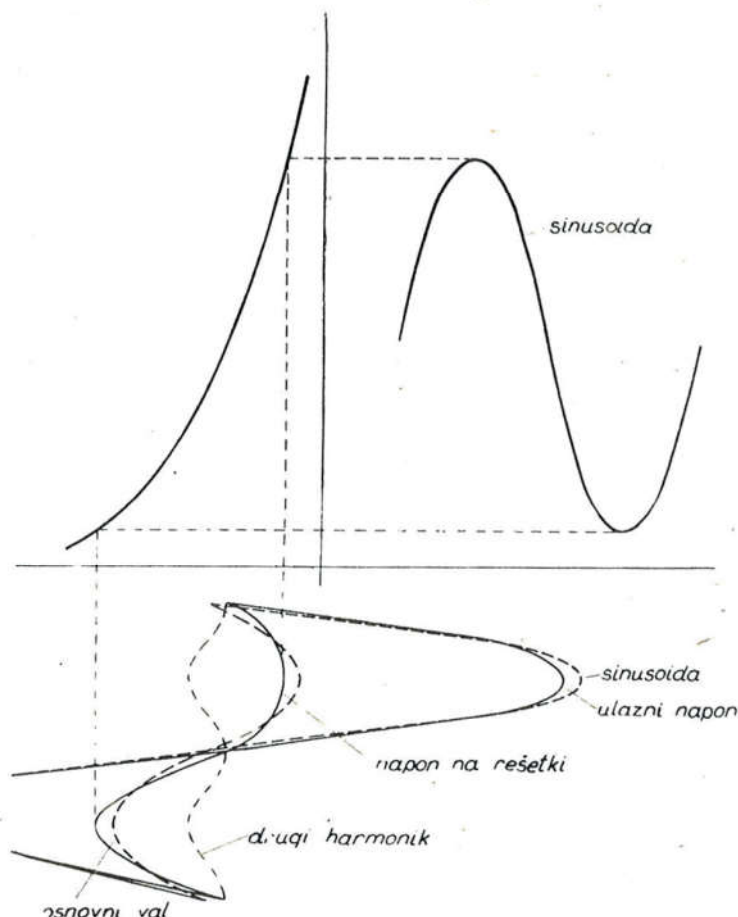
Sl. 26. a) Zbog zakrivljenosti rešetkine karakteristike elektronke dolazi do izobličenja anodne struje. b) Primjenom NR napon na rešetki se tako izobličuje (u odnosu na ulazni napon), da izobličenje anodne struje postane manje.

tivnog. Budući da ova izmjenična komponenta anodne struje protiče anodnim otporom, to je napon na ovom otporu, odnosno napon na elektronki, po obliku posve sličan anodnoj struji. Primjenom NR se (uz nepromijenjeni ulazni napon) izmjenična komponenta anodne struje smanji, ali se smanji i izobličenje, kao što se to vidi iz sl. 26b. Ovdje je pozitivni poluval samo dva puta viši od negativnog. Iz iste slike vidimo, kako do toga dolazi. U rešetkinom krugu djeluje reakcioni napon, koji je po obliku posve sličan anodnoj struji. Na samoj rešetki, to jest između rešetke i katode, djeluje napon, koji je jednak razlici između ulaznog napona i reakcionog napona. Ovaj napon je izobličen, ali njegovo izobličenje je upravo suprotno onome u anodnom krugu. Vidimo, naime, da na strmijem dijelu karakteristike djeluje poluval, koji je u većoj mjeri smanjen u odnosu na ulazni napon, nego onaj, koji djeluje na položitijem dijelu karakteristike.

Do smanjenja izobličenja nije došlo zbog toga, što je napon na rešetki postao manji. To se vrlo dobro vidi iz sl. 26a. Smanjivanjem napona na rešetki

ostaje odnos između vršnih vrijednosti pozitivnog i negativnog poluvala anodne struje nepromijenjen, dakle izobličenje ostaje isto. Do smanjenja izobličenja dolazi samo zbog toga, što se prisustvom izobličenog reakcionog napona napon na rešetki tako izobliči, da anodna struja postane u odnosu na ulazni napon manje izobličena.

2. Anodni napon sinusoidan, rešetkin nesinusoidan. — Ni ovom prilikom ne ćemo zaboraviti onaj naš način, prema kojem smo promatranje procesa u anodnom krugu prenijeli u rešetkin krug. Mi ćemo na rešetku elektronke



Sl. 27. Promatranje izobličenja možemo i obrnuti: neka je napon na rešetki izobličen prema anodnoj struji. Dodavanjem reakcionog napona, koji je sada neizobličen, postaje »novi napon na rešetki«, to jest ulazni napon, manje izobličen. Sinusoida uz ulazni napon nacrtana je radi usporedbe.

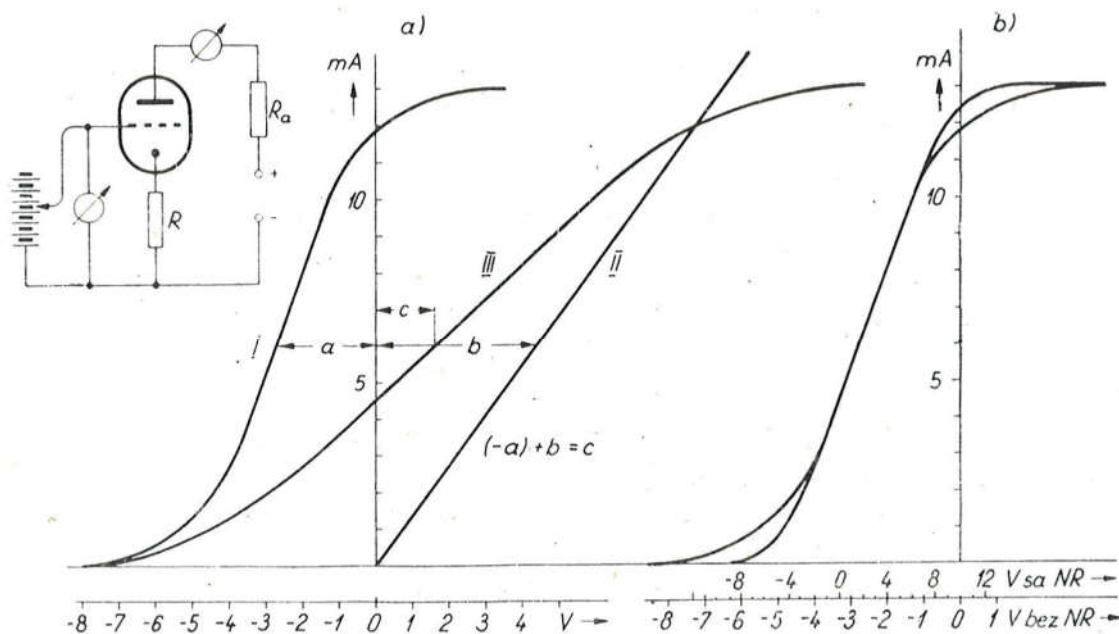
dovesti napon takvog oblika, da nakon izobličenja¹ u anodnom krugu dobivamo upravo sinusoidnu struju, odnosno na anodi elektronke (ili na anodnom otporniku) sinusoidni napon, kao što pokazuje sl. 27. Napon na rešetki sadržava, dakle, u odnosu na sinusoidu, stanoviti postotak harmonika. Dodamo li

¹ Napon (ili struja) u anodnom krugu izobličen je onda, kad nije sličan naponu na rešetki. Prema tome anodni napon (ili struja) u našem slučaju je izobličen, iako je sinusoidan. Pod izobličenjem ne razumijevamo odstupanje od sinusoidnog oblika, nego odstupanje od oblika originalnog napona (ili struje).

naponu rešetke reakcioni napon, koji je u ovom slučaju sinusoidan, to će napon harmonika ostati isti, ali će se promijeniti napon osnovnog vala, jer je ulazni napon jednak naponu osnovnog vala na rešetki uvećanom za reakcioni napon. Postotak harmonika u novom naponu bit će prema tome manji, i to upravo onoliko puta, koliko puta se je povećao osnovni val. Kako se je upravo toliko puta smanjilo pojačanje, to iz toga izlazi, da se postotak harmonika, koji unosi elektronka svojim izobličivanjem, smanji primjenom NR u istoj mjeri, kao i pojačanje.

Poslužimo se još brojčanim primjerom: Neka je efektivna vrijednost osnovnog vala u izmjeničnom naponu na rešetki 5 volta, a efektivna vrijednost napona drugog harmonika neka je 0,5 volta. Faktor izobličenja, dakle, iznosi: $k = 0,5/5 = 0,1$ ili 10%. Ako reakcioni napon iznosi 20 volta, onda će ulazni napon imati vrijednost $5 + 20 = 25$ volta. Pojačanje pojačala postalo je primjenom NR pet puta manje. No isto tako i faktor izobličenja: $k' = 0,5/25 = 0,02$ ili 2%.

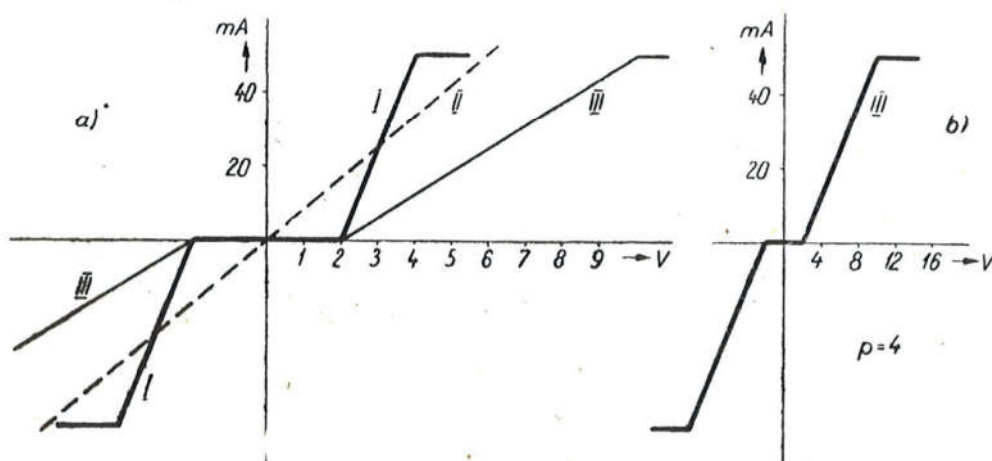
3. Smanjenje harmoničkog izobličenja posljedica lineariziranja radne karakteristike. — Smanjenje harmoničkog izobličenja može se gledati i kao rezultat lineariziranja karakteristike elektronke. U glavi prvoj, poglavlje 3. vidjeli smo, kako NR linearizira anodne karakteristike. Na sl. 28. pokazat ćemo, kako se može konstruirati rešetkina karakteristika elektronke u NR. Krivulja I prikazuje ovisnost anodne struje o naponu rešetke prema katodi, kad se u anodnom krugu nalazi otpor (radna karakteristika bez NR). Napon na reakcionom otporu R linearno je ovisan o anodnoj struji. Na sl. 28a to prikazuje pravac II. Zbrajanjem napona rešetke i reakcionog napona dobiva



Sl. 28. a) Zbrajanjem rešetkine karakteristike I i karakteristike reakcionog otpora II dobiva se karakteristika III, koja predstavlja »rešetkinu« karakteristiku elektronke u NR. b) Promjenom skale za ulazni napon karakteristike I i III djelomično se preklapaju, tako da je lineariziranje, koje je nastalo djelovanjem NR, lakše vidljivo.

se ulazni napon. Ovakvim zbrajanjem dobivena je karakteristika III. Ova karakteristika prikazuje ovisnost anodne struje o ulaznom naponu. Da bismo karakteristiku III mogli uspoređivati s karakteristikom I, potrebno je za karakteristiku III promijeniti skalu na horizontalnoj osi. Kao što otprije znamo, strmina elektronke u strujnoj NR je p puta manja nego bez NR. Ako, dakle, podjeljke na horizontalnoj osi smanjimo p puta, preklopit će se karakteristika III u svom srednjem dijelu preko karakteristike I, kao na sl. 28b. Sada se dobro vidi, kako je NR linearizirala karakteristiku, i zašto je prema tome harmoničko izobličenje manje.

Do smanjenja zakrivljenosti karakteristike uslijed djelovanja NR dolazi čak i kod protufaznog stupnja klase C. Na sl. 29. prikazane su karakteristike



Sl. 29. a) Karakteristika I predstavlja rešetkinu karakteristiku protufaznog pojačala u klasi C. Nakon zbrajanja s karakteristikom reakcionog napona II (vidi sl. 28.) dobiva se karakteristika III, koja ima koljeno kod ± 2 volta s tupljim kutom, dakle uzrokuje manje izobličenje. b) Ovdje je promjenom naponske skale karakteristika III dobila isti nagib, koji ima karakteristika I. Iz ove se slike vidi, da karakteristika III u svom srednjem dijelu manje odstupa od pravca, nego karakteristika I, što je razlog manjem izobličenju.

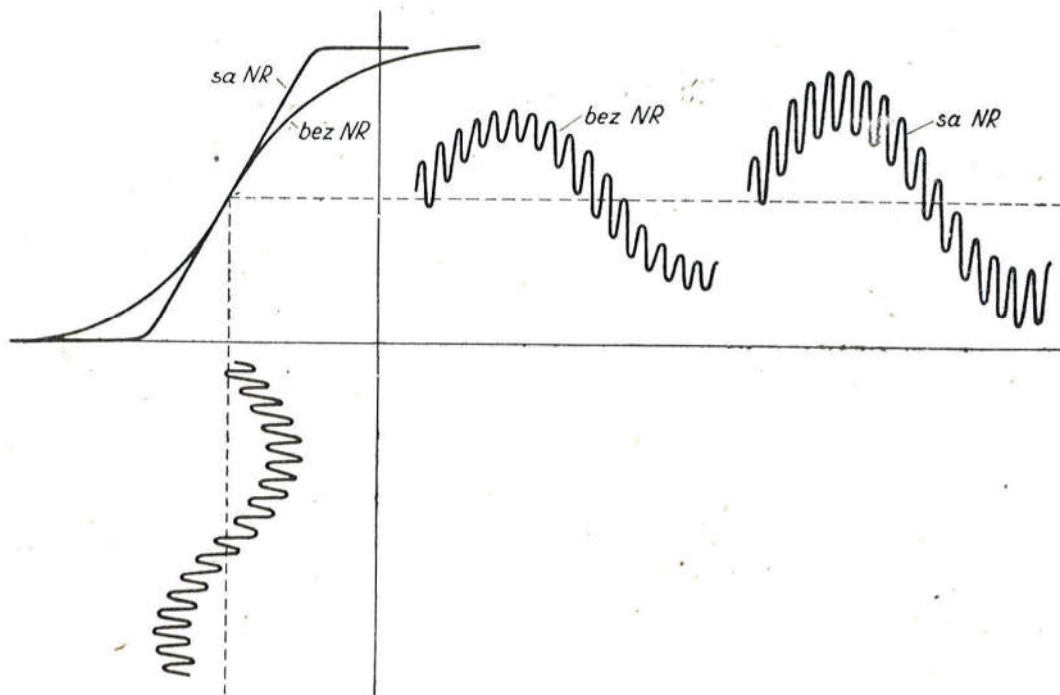
ovakvog stupnja bez NR i sa NR, kod koje je $p = 4$. Vidimo, da je zakrivljenje u srednjem dijelu znatno blaže. To znači, da će pojačalo klase B, koje nekim slučajem dobije preveliki prednapon, te tako prijeđe u klasu C, manje izobličivati uz primjenu NR, nego bez nje.

Sve ono, što vrijedi za slučaj, kad se na rešetku dovodi signal jedne frekvencije, vrijedi i onda, kad je signal sastavljen od više frekvencija. Na sl. 30. prikazan je najjednostavniji slučaj, kad je signal sastavljen od dviju vrlo različitih frekvencija. NR i ovdje, linearizirajući karakteristiku elektronke, smanjuje izobličenje. Dakle: također izobličenje *transmodulacije* postaje djelovanjem NR manje.

4. Harmoničko izobličenje je toliko puta manje, koliko puta i pojačanje.

— Sada ćemo još svemu ovome, što smo izložili u vezi sa smanjivanjem harmoničnog izobličenja pomoću NR, dati matematski oblik. Time, što je u anodnom krugu došlo do izobličenja, došlo je zapravo do pojave novih napona nekih drugih frekvencija. Neka se, na primjer, da bude jednostavnije, radi

samo o jednom novom naponu, koji ima frekvenciju dvostruko višu od frekvencije signala, dakle, neka se radi o drugom harmoniku. O osnovnom valu ne treba posebno voditi računa, jer će se on, kako što smo čuli u glavi drugoj, poglavlje 2., smanjiti u istoj mjeri, u kojoj se uslijed NR smanji pojačanje pojačala. Što će se dogoditi s drugim harmonikom? Dok nema NR, napon



Sl. 30. Također kod napona složenog valnog oblika NR djeluje povoljno, jer smanjuje izobličenje transmodulacije.

ovog harmonika iznosi D volta, Kao posljedica djelovanja NR napon harmonika se smanji na D' volta. Do toga dolazi tako, što dio ovog novog napona, i to u iznosu $\beta D'$ volta, djeluje na rešetki protufazno kao reakcioni napon, i pri tome se u elektronki pojačava A puta, to jest poprima vrijednost $\beta AD'$ volta: Elektronka je prema tome izvor dvaju napona — napona D volta i napona $\beta AD'$ volta — koji su protufazni. Njihova razlika daje vrijednost harmonika D' , koji se dobije primjenom NR:

$$D - \beta AD' = D' \quad (23)$$

Odavle je:

$$D' = \frac{D}{1 + \beta A} = \frac{D}{p} \quad (24)$$

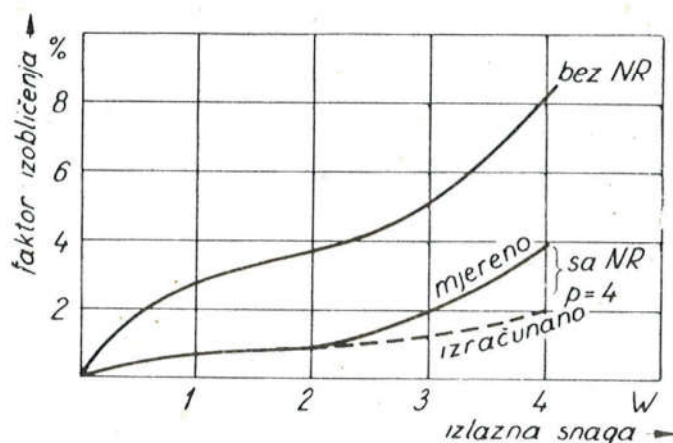
Ova formula je posve slična onima, koje smo dosad imali. Dakle: također harmoničko izobličenje smanjuje se u istoj mjeri kao i pojačanje.

5. Smanjivanje harmoničkog izobličenja posljedica niveliranja pojačanja.

— Kao što vidimo, obje vrste izobličenja — prigušno i harmoničko — smanjuju se djelovanjem NR u istom omjeru kao i pojačanje. Do smanjenja prigušnog izobličenja dolazi zbog toga, što je faktor smanjenja pojačanja kod

većih pojačanja veći, te se razlike u pojačanju ublažuju. Zašto, zapravo, dolazi do harmoničkog izobličenja? Zato, što elektronka (ili pojačalo) drugačije pojačava pozitivni, a drugačije negativni poluval izmjeničnog napona na rešetki. Ili još točnije: zato, što drugačije pojačava momentane vrijednosti pozitivnog poluvala, nego odgovarajuće momentane vrijednosti negativnog poluvala. A budući da NR ublažuje razlike u pojačanju, to će također harmoničko izobličenje biti manje.

6. Kod većih harmoničkih izobličenja smanjenje izobličenja manje nego smanjenje pojačanja. — Pravilo o smanjenju harmoničkog izobličenja u istom omjeru, u kojem se smanjuje pojačanje, ne vrijedi općenito. Ono vrijedi samo dotle, dok je izobličenje maleno. Kad je postotak harmonika velik, onda i kod harmonika, koji preko reakcionog napona dopiju na rešetku, dolazi do



Sl. 31. Kod većih faktora izobličenja nije smanjenje izobličenja, do kojeg dolazi djelovanjem NR, razmjerno smanjenju pojačanja. Dijagram se odnosi na elektronku AL 4.

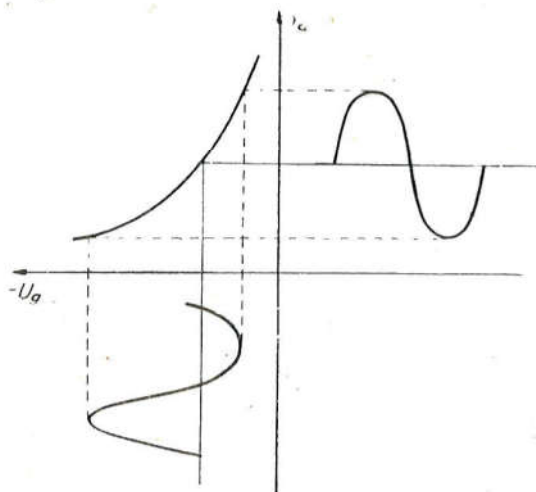
izobličenja. Tako se stvaraju novi harmonici. Zato elektronke kod većih izlaznih napona ne daju onako maleno izobličenje, kako bi izlazilo iz formule (24), odnosno, kako bi slijedilo iz smanjenja pojačanja. Karakteristike izobličenja na sl. 31. pokazuju, kako elektronka AL 4 u NR samo do izlazne snage od 2 vata daje izobličenje, koje je smanjeno razmjerno smanjenju pojačanja. Iznad ove snage izobličenje je veće od onog, koje se dobije računom po formuli (24).

7. Nastajanje novih harmonika. — Zbog izobličivanja harmonika događa se, da izoblićeni napon kod elektronke u NR sadržava i takve harmonike, kojih nema u izobličenom izlaznom naponu, ako NR nije primijenjena. Kako do toga dolazi, razjašnjava sl. 32. Napon na rešetki, kao što se može vidjeti iz oblika, sadržava drugi harmonik. No zbog odgovarajuće zakrivljenosti karakteristike elektronke anodna struja je tako izobličena, da sadržava treći harmonik.¹ Ovaj pojav može biti razlogom, da treći harmonik postane primjenom NR veći, nego bez NR. Takav slučaj nastaje onda, ako je drugi har-

¹ Razlika u vršnim vrijednostima između pozitivnog i negativnog poluvala karakteristična je za izmjenični napon, koji sadržava drugi harmonik. Kod napona, koji sadržava treći harmonik, karakteristično je, da su vršne vrijednosti međusobno jednake.

monik mnogo veći od trećeg harmonika, i ako je faktor smanjenja pojačanja malen (NR slaba).¹ Budući da se najčešće radi s jačom NR, to ovakav slučaj jedva da se može pojaviti u praksi.

8. Oprez od izobličenja u pretpojačalu! — Smanjenje harmoničkog izobličenja dobiva se na račun pojačanja. To znači, da u koliko većoj mjeri želimo pomoću NR smanjiti harmoničko izobličenje, u toliko veći ulazni napon moramo privesti pojačalu, da dobijemo isti izlazni napon. Pri tome se može dogoditi, da pretpojačalo nije u mogućnosti, da dade dovoljno velik neizobli-



Sl. 32. Napon na rešetki, koji sadržava samo drugi harmonik, može u anodnom krugu preko odgovarajuće karakteristike elektronke stvoriti treći harmonik.

čen napon, to jest može se dogoditi, da pretpojačalo bude izvor izobličenja. Prije, nego što se primijeni NR, treba, dakle, utvrditi, ne će li smanjenje harmoničkog izobličenja u pojačalu sa NR biti poništeno ili čak premašeno povećanjem izobličenja u pretpojačalu.

9. Pojačalo u negativnoj reakciji može uzrokovati neugodnija harmonička izobličenja, nego bez negativne reakcije. — Uz amplitude ulaznog napona, koje ne prelaze donje i gornje koljeno radne karakteristike, prednost primjene NR je očita, jer je izobličenje manje, nego bez NR. No kod prepo-

¹ Treći harmonik kod pojačala u NR može se izračunati po formuli:

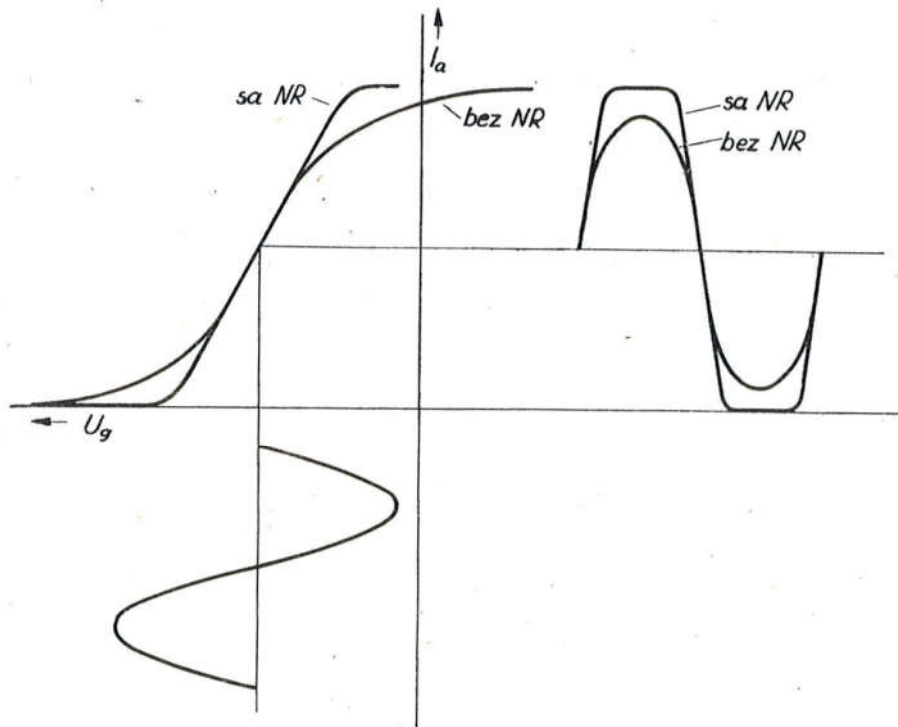
$$k_3' = \frac{k_3}{p} - 2 \frac{k_2^2}{p} \quad (25)$$

gdje je k_2 odnos drugog harmonika, a k_3 odnos trećeg harmonika prema osnovnom valu. Uzmimo, na primjer, da je $k_2 = 0,2$ ili 20%, $k_3 = 0,01$ ili 1%, a $p = 2$. Iz gornje formule izlazi:

$$k_3' = \frac{0,01}{2} - 2 \frac{0,2^2}{2} = 0,035 \text{ ili } 3,5\%$$

Treći harmonik je u ovom primjeru zbog NR porastao sa 1% na 3,5%.

buđenja, što se kod pojačala za akustičke svrhe ne može posve izbjeći, NR ne pruža prednosti, nego upravo obrnuto. Zbog naglog prelaza radne rešetkine karakteristike u horizontalu ispod donjeg i iznad gornjeg koljena (vidi krivulju III na sl. 28.b) nastaje takvo izobličenje, koje uho osjeća kao vrlo neugodno. Dok, naime, izobličena krivulja napona sadržava samo niže harmonike (na primjer, do petoga), dotle je izobličenje podnosivo za uho. No krivulja s odrezanim vrhovima, kao na sl. 33., sadržava velik broj harmonika vrlo visokog reda, tako da faktor izobličenja, definiran kao odnos napona harmoničkih članova prema naponu osnovnog vala, prestaje s obzirom na uho biti mjerom kvalitete. Ovo isto vrijedi i u vezi s izobličenjem transmodulacije.

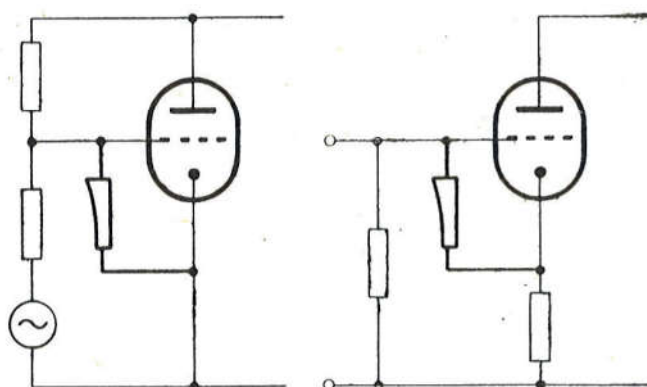


Sl. 33. Pojačalo u NR daje kod prepobuđenja veće izobličenje, nego bez NR.

10. Negativna reakcija primijenjena u jednom stupnju ne smanjuje izobličenje od struje rešetke. — Struja pobudne rešetke nije linearno ovisna o naponu na rešetki. Zbog toga nije ni pad napona, koji ova struja izaziva na unutarnjem otporu izvora signala, pa prema tome ni napon rešetke, sličan naponu izvora. Ovo izobličenje je naročito veliko, ako do struje rešetke dolazi samo u jednom dijelu poluperiode.

Dok nema struje rešetke, otpor između rešetke i katode je vrlo velik, i dan je praktički samo izolacionim otporima. Pojava struje rešetke očituje se tako, kao da je između rešetke i katode spojen otpor, kojemu je vrijednost određena naponom rešetke podijeljenim sa strujom rešetke. Kao što smo

gore spomenuli, odnos između ovog napona i struje nije linearan, te se radi o promjenljivom otporu. Primjenom naponske ili strujne NR kod jednog stupnja nalazi se ovaj promjenljivi otpor kao što se vidi na sl. 34., u djelitelju anodnog, odnosno reakcionog napona, zbog čega *stupanj NR nije konstantan za vrijeme jedne poluperiode. Prema tome NR u ovom slučaju ne smanjuje izobličenje nastalo uslijed struje rešetke.* Jedino, ako se NR primjenjuje preko više stupnjeva pojačala, tako da se nelinearni otpor rešetka-katoda ne nalazi u reakcionoj grani, dolazi do smanjenja i onog izobličenja, koje uzrokuje struja pobudne rešetke.



Sl. 34. Djelovanje rešetkine struje jednako je djelovanju odgovarajućeg nelinearnog otpora u rešetkinom krugu. Ovaj otpor sudjeluje u dijeljenju reakcionog napona, iz čega slijedi, da NR ne može smanjiti izobličenje nastalo uslijed struje rešetke.

11. Zbog prigušnog izobličenja može doći do harmoničkog izobličenja.

— Amplituda napona na rešetki izlazne elektronke ograničena je najvećim dopustivim harmoničkim izobličenjem. Zato u područjima frekvencija, u kojima je reakcioni napon zbog opadanja pojačanja manji, može doći do prepobuđenja elektronke. Objasniti ćemo ovo na jednom primjeru.

Kod normalnih malih izlaznih elektronki maksimalna amplituda napona na rešetki iznosi 6 volta. Uz trostruku NR ulazni napon je tri puta veći, to jest ima vrijednost od 18 volta, dok je vrijednost reakcionog napona 12 volta. Ako zbog premalenog primarnog induktiviteta izlazni napon u korisnom frekventnom području padne za trećinu, onda se i reakcioni napon smanji za toliko, te iznosi 8 volta. No ulazni napon je ostao isti, što znači da sada na rešetku dolazi preostalih 10 volta. Ovolikim naponom elektronka je prepobuđena, te dolazi do harmoničkog izobličenja, koje NR ne može smanjiti. O ovom treba voditi računa naročito u slučaju, kad se u izlaznom stupnju upotrebljavaju korektori, odnosno regulatori boje tona.

5. Negativna reakcija mijenja izlazni otpor pojačala

Pod izlaznim otporom pojačala razumijeva se unutarnji otpor pojačala kao izvora izmjeničnog napona i struje. Kod pojačala bez NR izlazni otpor je dan unutarnjim otporom izlazne elektronke. Ako se na izlazu pojačala nalazi transformator, onda izlazni otpor predstavlja unutarnji otpor izlazne elektronke transformiran na sekundarnu stranu.¹

Razlika između naponske i strujne NR s obzirom na svojstva, koja pojačalo njihovom primjenom dobiva, očituje se samo u vezi s izlaznim otporom.

1. Izlazna elektronka u negativnoj reakciji i izlazni otpor. — Kad je izlazna elektronka pojačala sama u naponskoj NR, onda u slučaju bez izlaznog transformatora za izračunavanje izlaznog otpora pojačala vrijedi formula, koju već poznajemo:

$$R_o' = \frac{R_i}{1 + \beta\mu} \quad (26)$$

Kod pojačala, koje ima izlazni transformator s odnosom zavoja $n = z_1/z_2$ (z_1 je broj primarnih, a z_2 broj sekundarnih zavoja), treba izlazni otpor, izračunan po formuli (26) podijeliti sa n^2 (sl. 35.).

Kao što se vidi iz formule (26), izlazni otpor se ne smanjuje u jednakoj mjeri kao i pojačanje, jer se u nazivniku uz β ne nalazi pojačanje A , već faktor pojačanja μ . Stoga naponska NR drugačije smanjuje izlazni otpor kod trioda, nego kod pentoda. Kod trioda je u normalnom sklopu opterećeni otpor znatno veći od unutarnjeg otpora, te je faktor pojačanja μ praktički jednak pojačanju A . Prema tome će se kod pojačala, koje ima na izlazu *triodu u naponskoj NR*, izlazni otpor smanjiti gotovo u istoj mjeri kao i pojačanje. Kod pentoda će biti drugačije. Opterećeni otpor pentode je normalno znatno manji od njezinog unutarnjeg otpora, te je A mnogo manje od μ . To je razlog, zbog čega se kod pentoda u naponskoj NR izlazni otpor smanji znatno više, nego što se smanji pojačanje.

¹ Izlazni otpor pojačala može se dobiti mjerenjem napona U_o neopterećenog izlaza i napona U_t na otporu R_t , koji vrijedi kao normalni opterećeni otpor pojačala. Budući da se otpori odnose kao naponi na njima, to vrijedi:

$$\frac{R_o}{R_t} = \frac{U_o - U_t}{U_t} \quad (27)$$

Odavle je izlazni otpor:

$$R_o = R_t \cdot \frac{U_o - U_t}{U_t} \quad (28)$$

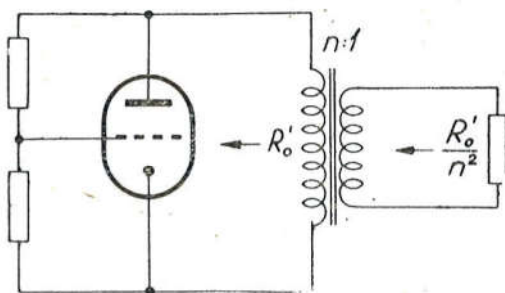
Sasvim razumljivo, da kod ovakvog mjerenja nužno mjerimo ne samo transformirani unutarnji otpor izlazne elektronke, nego i k tome dodane otpore izlaznog transformatora (otpore primara i sekundara, otpore rasipnih induktiviteta, i t. d.). Budući da ovdje ima i otpora ovisnih o frekvenciji, to će se također izlazni otpor (izlazna impedancija) mijenjati s promjenom frekvencije. Kad se o vrijednosti izlaznog otpora (ili impedancije) govori općenito, onda se misli na onaj otpor, koji pojačalo ima u području frekvencija, u kojem je pojačanje pojačala uglavnom konstantno.

Gore naveden način mjerenja izlaznog otpora vrijedi sasvim općenito, pa prema tome i za pojačalo, kod kojeg je primijenjena NR.

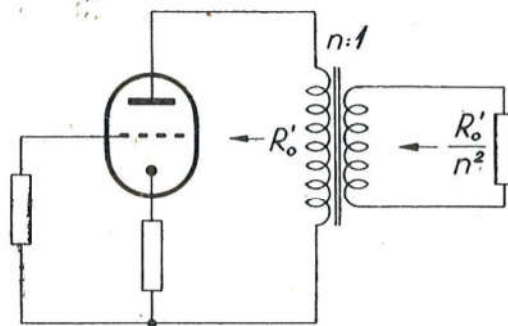
Uz iste prilike kao gore (izlazna elektronka sama u NR, bez izlaznog transformatora), ali uz primjenu strujne NR, može se izlazni otpor pojačala izračunati po formuli, koju također već poznajemo:

$$R'_o = R_i (1 + RS) \quad (29)$$

Razumljivo, da i u ovom slučaju vrijedi pravilo, po kojemu kod pojačala s izlaznim transformatorom, koji ima odnos zavoja n , treba otpor izračunan po gornjoj formuli podijeliti sa n^2 (sl. 36.).



Sl. 35. Izlazni transformator transformira izlazni otpor elektronke. Ako transformator smanjuje napon, onda na izlazni otpor pojačala ima isto djelovanje, kao naponska NR, to jest smanjuje ga.



Sl. 36. Izlazni transformator, koji smanjuje napon, djeluje na izlazni otpor pojačala suprotno od strujne NR, koja ga povećava.

Usporedimo formulu (11) s formulom (29)! U prvoj se uz R nalazi dinamička strmina S_d , a u drugoj statička strmina S . Na izmjeničnu anodnu struju kod pentoda vrlo malo utječe dodavanje opterećnog otpora (jer je $R_a \ll R_i$), te je dinamička strmina gotovo jednaka statičkoj. To znači, da će se izlazni otpor kod pentoda u strujnoj NR povećati u istoj mjeri, u kojoj se smanji pojačanje. Kod trioda zbog velikog omjera između opterećnog i unutarnjeg otpora postoji velika razlika između statičke i dinamičke strmine, pa se izlazni otpor uz primjenu strujne NR znatno više poveća, nego što se pojačanje smanji.

Strogo uzevši, u izlazni otpor pojačala treba osim povećanog unutarnjeg otpora elektronke ubrojiti i reakcioni otpor R , te se tako dobiva formula:

$$R'_o = R_i (1 + RS) + R \quad (30)$$

Uz pomoć jednadžbe $R_i \cdot S/\mu = 1$ gornja formula dobiva oblik:

$$R'_o = R_i + (\mu + 1) R \quad (31)$$

Izvršimo li istu zamjenu u formuli (29), dobivamo:

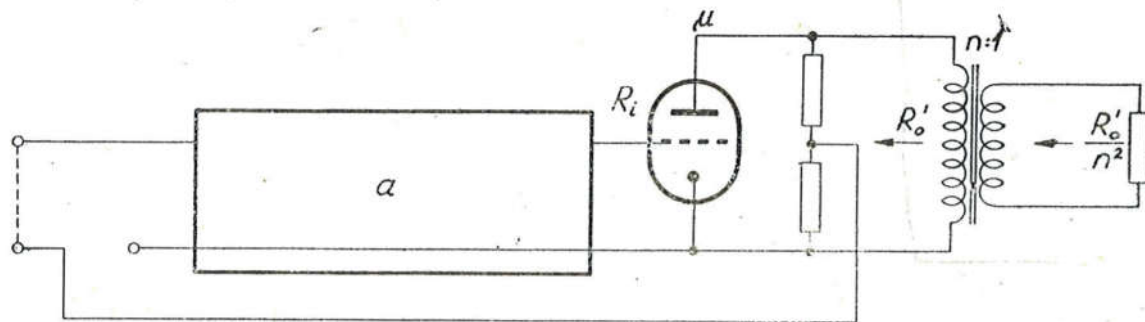
$$R'_o = R_i + \mu R \quad (32)$$

2. Izlazni otpor uz negativnu reakciju primijenjenu preko više stupnjeva. — Ako je NR primijenjena preko više stupnjeva pojačala, onda se onaj dio izlaznog napona, koji je određen faktorom β , još pojačava u prethodnim stupnjevima, prije nego što stigne do rešetke izlazne elektronke. Ozna-

čimo li pojačanje prethodnih stupnjeva sa a (sl. 37.), formula za izlazni otpor će glasiti:

$$R_o' = \frac{R_i}{1 + \beta a \mu} \quad (33)$$

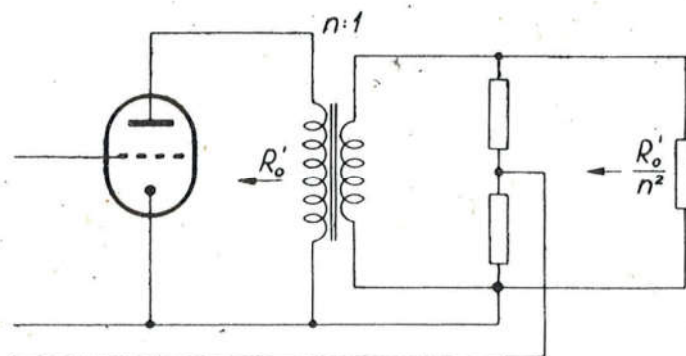
Ovdje je R_i unutarnji otpor izlazne elektronke, a je pojačanje prethodnih stupnjeva bez NR, i to pojačanje od mjesta, gdje reakcioni napon ulazi u pojačalo, pa do rešetke izlazne elektronke. Faktor β je dio anodnog izlaznog



Sl. 37. Kad se u petlji NR nalazi više stupnjeva pojačala, onda je izlazni otpor ovisan osim o faktoru pojačanja μ izlaznog stupnja još i o pojačanju a prethodnih stupnjeva.

napona, a μ faktor pojačanja izlazne elektronke. R_o' je izlazni otpor gledan od primara izlaznog transformatora prema elektronki. Da se dobije R_o' reduciran na sekundarnu stranu, treba otpor dobiven formulom (33) podijeliti s kvadratom odnosa zavoja transformatora.

Reakcioni napon može se uzimati i sa sekundarne strane transformatora (sl. 38.). U tom slučaju za μ (ili β) treba u formule (26) i (33) uvrstiti vrijednost, koja je n puta manja.



Sl. 38. Uzimanjem reakcionog napona sa sekundara izlaznog transformatora postaje β ili μ manje n puta.

3. Drugačiji oblici formule za izlazni otpor. — Kod pojačala za akustičke svrhe nastoji se, da izlazni otpor bude što manji, kako bi istitravanje zvučnika bilo što više prigušeno. Budući da se smanjenje izlaznog otpora dobiva naponskom NR, to ćemo formuli za izračunavanje izlaznog otpora u slučaju naponske NR posvetiti više pažnje.

Formula (26) nije naročito prikladna za praksu, jer vrijednost faktora β nije lako odrediti, ako nisu poznate vrijednosti otpora u djelatelju napona. U praksi je lakše izmjeriti smanjenje pojačanja, koje nastaje primjenom NR. Zato ćemo formulu za izračunavanje izlaznog otpora preurediti tako, da u njoj ne bude faktora β .

Iz formule (10), po kojoj se izračunava pojačanje uz NR, izlazi:

$$\beta = \frac{A - A'}{A \cdot A'} = \left(\frac{A}{A'} - 1 \right) \frac{1}{A} = (p - 1) \frac{1}{A} \quad (34)$$

Uvrštavanjem ovog izraza umjesto β dobiva formula (26) novi oblik:

$$R_o' = \frac{R_i}{1 + (p - 1) \frac{\mu}{A}} \quad (35)$$

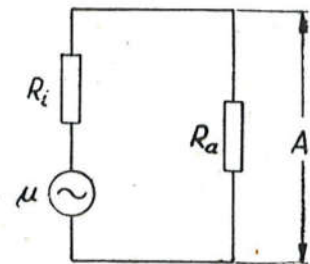
Ako se u petlji NR nalazi više stupnjeva pojačala, onda u formulu (35) treba umjesto μ uvrstiti $a\mu$ gdje a ima isto značenje, kao u formuli (33).

Formulu (35) možemo i dalje transformirati, i to tako, da faktor pojačanja μ izrazimo unutarnjim¹ i opterećenim otporom. Iz nadomjesne sheme elektronke kao pojačala izlazi odnos (sl. 39.):

$$\frac{\mu}{A} = \frac{R_i + R_a}{R_a} \quad (36)$$

tako da formula (35) poprima ovaj oblik:

$$R_o' = \frac{R_i}{1 + (p - 1) \cdot \frac{R_i + R_a}{R_a}} \quad (37)$$



Sl. 39. Nadomjesna shema elektronke kao pojačala uz napon rešetke od 1 volta.

4. Smanjivanjem unutarnjeg otpora izlazne elektronke smanjuje se harmoničko izobličenje izlaznog transformatora. — Do harmoničkog izobličenja kod transformatora dolazi onda, kada struja magnetiziranja, koja je zbog nelinearne magnetske karakteristike izobličena, protiče kroz neki otpor spojen s primarom u seriju. Na ovom otporu nastaje tada izobličen pad napona, te i napon na primaru, (pa prema tome i na sekundaru) postaje izobličen. Kod izlaznog stupnja ulogu ovog serijskog otpora ima unutarnji otpor izlazne

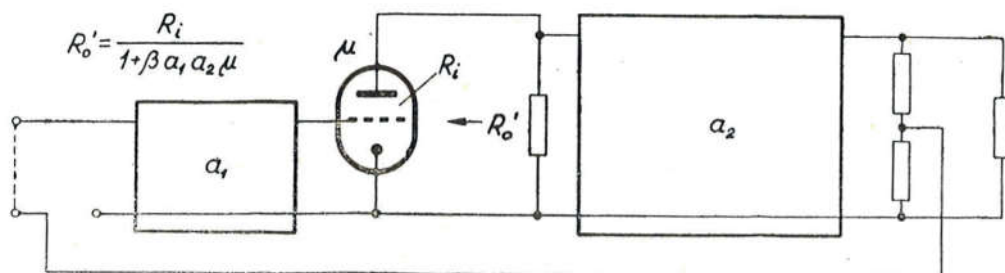
¹ Vrijednost, koju ima unutarnji otpor elektronke R_i , nije uvijek moguće u priručnicima naći za svaki protufazni sklop. Na primjer, za pojačalo klase AB1 i AB2 (naročito, ako se prednapon dobiva na katodnom otporniku), rijetko se daje vrijednost za R_i , jer se ovaj otpor mijenja za vrijeme jedne periode. Za takav slučaj može se iz formule (36) dobiti druga formula, prema kojoj je moguće R_i izračunati:

$$R_i = R_a \left(\frac{\mu}{A} - 1 \right) \quad (38)$$

Ovdje je A pojačanje, koje izlazni stupanj ima kod maksimalnog signala. Kod protufaznih sklopova mogu se otpori R_o , R_i i R_a smatrati kao veličine od anode do anode.

elektronke. Budući da se primjenom naponske NR unutarnji otpor elektronke smanji, to će se istodobno smanjiti i harmoničko izobličenje transformatora.

5. Naponska negativna reakcija smanjuje izlazni otpor svakog stupnja pojačala. — Dosada smo govorili samo o smanjenju izlaznog otpora pojačala kao cjeline. No naponska NR smanjuje izlazni otpor svakog pojedinog stupnja unutar petlje NR. Do toga zaključka može se doći uspoređivanjem sl. 40. sa sl. 37. Na sl. 40. R'_o je izlazni otpor jednog međustupnja u pojačalu, a μ je



Sl. 40. NR djeluje i na izlazne otpore pojedinih međustupnjeva, koji su uključeni u petlju NR.

faktor pojačanja toga međustupnja. Iz sheme na sl. 37. vidi se, da je izlazni napon došao na rešetku izlazne elektronke tako, što je najprije bio smanjen u omjeru faktora β , a zatim pojačan a puta. Do rešetke međustupnja dolazi njegov izlazni napon tako, da se najprije pojača u slijedećim stupnjevima a_2 puta, zatim umanjuje u omjeru faktora β , i na koncu u prethodnim stupnjevima pojača a_1 puta. Kao što vidimo, između ova dva slučaja nema principijelne razlike, iz čega se može zaključiti, da se naponskom NR također i međustupnjevima, koji se nalaze unutar petlje NR, smanjuje izlazni otpor. Važnost ovoga vidi se, na primjer, u slučaju kod pojačala klase B sa strujom rešetke, gdje je pogonski stupanj (»driver«) opterećen nelinearnim otporom, te se smanjivanjem izlaznog otpora ovog stupnja smanjuje također harmoničko izobličenje (isto onako, kao i kod izlaznog transformatora).

6. Istodobna primjena naponske i strujne negativne reakcije i izlazni otpor. — Naponska NR smanjuje izlazni otpor pojačala, a strujna ga povećava. Istodobnom primjenom obiju vrsta NR može izlazni otpor da bude veći ili manji od onoga bez NR, ovisno o tome, koja NR ima veći utjecaj (vidi formulu 8). U posebnom slučaju, kad je $\beta\mu = RS$, izlazni otpor ostaje nepromijenjen, a pojačalo ima sva ostala svojstva, koja unosi NR.

7. Naponska i strujna negativna reakcija i promjenljiv opteretni otpor. — Dok opteretni otpor pojačala ima konstantnu vrijednost, nema razlike u djelovanju između naponske i strujne NR. No kad se opteretni otpor mijenja, bilo da se pojačalo otperećuje različitim radnim otporima, bilo da se radi o otporu ovisnom o frekvenciji (o impedanciji), postoji bitna razlika između naponske i strujne NR.

Naponska NR se protivi promjenama napona na promjenljivom opteretnom otporu (smanjuje promjene u pojačanju), ona nastoji održati ovaj napon konstantnim. Ova NR djeluje, dakle, isto tako, kao što djeluje smanjenje unutarnjeg otpora generatora. Uz opteretne otpore, koji su mnogo veći od

unutarnjeg otpora generatora, ovaj utjecaj NR je neznatan, jer izlazni napon i bez NR malo ovisi o veličini opteretnog otpora.

Strujna NR se protivi promjenama struje, koja teče kroz promjenljivi opteretni otpor (smanjuje promjene u pojačanju), ona nastoji ovu struju održati konstantnom. Prema tome ova NR djeluje isto tako, kao da se povećao unutarnji otpor generatora. Ako je opteretni otpor mnogo manji od unutarnjeg otpora generatora, ovaj utjecaj NR je malen, jer ionako, to jest i bez NR, struja jedva da ovisi o opteretnom otporu.

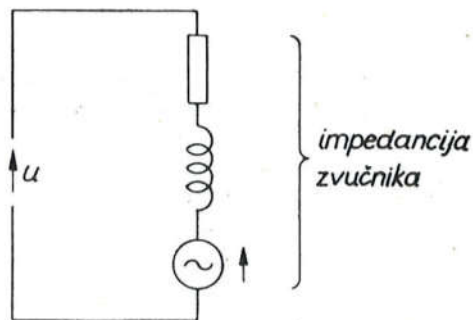
6. Ulazna impedancija pojačala u negativnoj reakciji

U svim dosadašnjim shemama bio je reakcioni napon doveden na ulaz pojačala tako, da je naponu rešetke dodavan u seriju. U glavi trećoj vidjet ćemo, da se reakcioni krug i rešetkin krug mogu spojiti također i paralelno. Prema tome se može govoriti o *serijskoj* i o *paralelnoj* NR. U ovom poglavlju razmotrit ćemo, do kakve promjene dolazi kod ulazne impedancije, ako se primijeni serijska NR.

1. Impendancija nije uvijek čista impedancija. — Pod impendancijom se obično razumijeva otporna vrijednost sklopa sastavljenog od radnih i reaktivnih elemenata (radnih otpora, kapaciteta i induktiviteta). No ima slučajeva, gdje u onakvom sklopu djeluje i elektromotorna sila, i sve zajedno se naziva impendancijom. S takvim sklopom već smo se sreli. Zar nije unutarnji otpor elektronke samo zato postao prividno manji (kod naponske NR), odnosno veći (kod strujne NR), što je elektronka pobuđena reakcionim naponom postala generator, a mi smo elektromotornu silu toga generatora izrazili adekvatnim otporom!

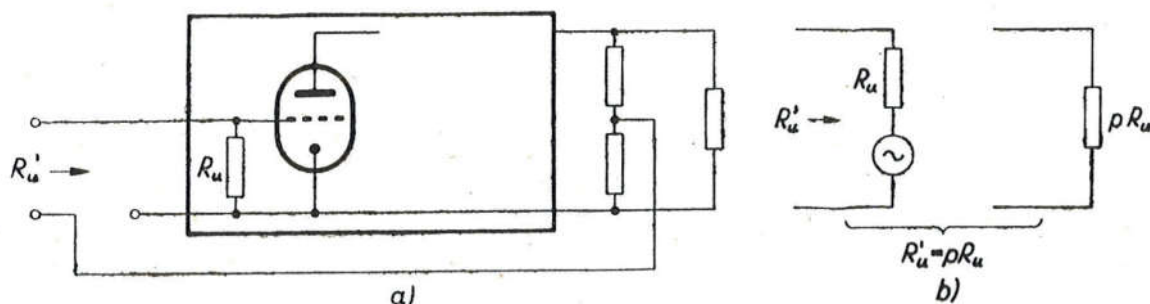
Tipičan primjer jedne ovakve »aktivne« impedancije jest impedancija titrajne zavojnice zvučnika. Kad se zvučnik priključi na izmjenični napon, poteče kroz njegovu zavojnicu izmjenična struja. No ova struja je manja, nego što bi odgovaralo radnom, i njemu u seriju spojenom induktivnom otporu zavojnice. To dolazi od toga, što se u zavojnici, koja titra u magnetskom polju, inducira izmjenična elektromotorna sila, uglavnom protufazna dovedenom naponu, tako da se prolazu struje kroz zavojnicu ne protivi samo njezin radni i induktivni otpor, nego još i ova elektromotorna sila (sl. 41.).

2. Negativna reakcija povećava ulazni otpor pojačala. — Kad smo promatrali, kako NR utječe na pojačanje, doveli smo na rešetku pojačala napon od 1 volta. Tako ćemo učiniti i ovom prilikom. Ovaj napon potjerat će kroz otpor R_u , koji je spojen na rešetku pojačala, odgovarajuću struju (sl. 42.a). Kad primijenimo NR, bit će potrebno na ulaz pojačala dovesti p puta veći napon nego prije, da bi se dobio isti izlazni napon. No napon na otporu R_u ostat će isti kao i prije, to jest 1 volt.



Sl. 41. Impendanciju zvučnika određuje radni i induktivni otpor njegove titrajne zavojnice, i protuelektromotorna sila, koja nastaje uslijed titranja zavojnice u magnetskom polju.

Prema tome će i struja, koja teče kroz ovaj otpor, ostati ista. Gledano s ulaza to možemo protumačiti i tako, kao da se ulazni otpor p puta povećao (sl. 42.b).

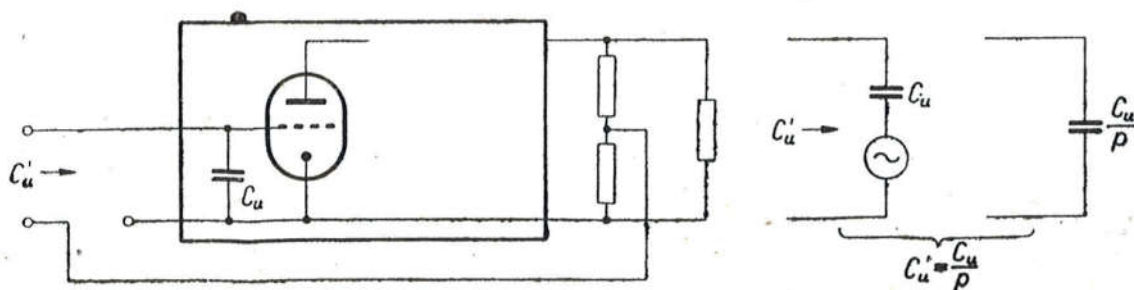


Sl. 42. Ulazni napon djeluje na otpor, koji je p puta veći od ulaznog otpora prve elektronke pojačala.

Ovo vrijedi kako za naponsku, tako i za strujnu (serijsku) NR. *Ulazni otpor se primjenom serijske NR povećava u istom omjeru, u kojem se smanji pojačanje:*

$$R'_u = p \cdot R_u \quad (39)$$

3. Negativna reakcija smanjuje ulazni kapacitet pojačala. — Posve isti zaključak, koji smo izveli za ulazni otpor, vrijedi i za ulazni kapacitet. Zbog pojave reakcionog napona ulazni napon će morati biti p puta veći od napona na rešetki, odnosno na ulaznom kapacitetu, da bi se dobio isti izlazni napon, kao u slučaju bez NR. Pri tome je struja, koju tjera izvor ulaznog napona,



Sl. 43. Ulazni napon djeluje na kapacitet, koji je p puta manji od ulaznog kapaciteta prve elektronke pojačala.

ista kao što bi bila u slučaju, da je kapacitivni otpor p puta veći, ili, što je isto, kapacitet p puta manji (sl. 43.):

$$C'_u = \frac{C_u}{p} \quad (40)$$

Ulazni kapacitet pojačala smanjuje se primjenom (serijske) NR u istoj mjeri, u kojoj se smanji pojačanje.

7. Negativna reakcija povećava konstantnost pojačanja kod pojačala

Pojačanje pojačala nije veličina, koja bi se mogla smatrati konstantnom. Uslijed starenja elektronke, izmjene elektronke, promjene pogonskih napona (na pr. zbog variranja napona električne mreže), uslijed temperaturne ovisnosti sastavnih elemenata, i t. d., dolazi do promjene pojačanja kod pojačala. Ove se promjene mogu uvelike smanjiti primjenom NR.

1. Promjene pojačanja se djelovanjem negativne reakcije smanjuju jednako kao i pojačanje. — Promjene pojačanja možemo, kao što smo već vidjeli, izraziti i kao promjene ulaznog napona, držeći izlazni napon konstantnim. Dovedemo li na rešetku pojačala napon od 1 volta, na izlazu pojačala imat ćemo A volta. Ako uslijed gore navedenih uzroka dođe do promjene pojačanja, onda ćemo morati napon na rešetki promijeniti. Uzmimo, da se je pojačanje pojačala smanjilo, te ćemo napon na rešetki morati, da bismo dobili isti izlazni napon od A volta, povećati za x volta. Tada ćemo na rešetki imati $(1 + x)$ volta. Kad se kod pojačala primijeni NR, onda će na ulaz pojačala biti potrebno dovesti napon, koji je za reakcioni napon veći od napona na rešetki. To je napon od $[(1 + x) + \beta A]$ volta odnosno $(p + x)$ volta. Dakle: i napon na rešetki, i ulazni napon promijenili su se za x volta. No dok je onaj prvi porastao sa 1 volta na $(1 + x)$ volta, dotle je onaj drugi porastao sa p volta na $(p + x)$ volta, gdje je p veće od 1. Relativna promjena kod drugog je prema tome manja. Uzmimo u obzir samo promjenu napona u odnosu na prijašnji napon. Na rešetki se je napon promijenio za x volta, što u odnosu na prijašnji napon na rešetki od 1 volta daje relativnu promjenu od $x/1$, dakle x (odnosno $100x\%$). Ulazni napon se je također promijenio za x volta, ali u odnosu na prijašnji napon od p volta dobiva se relativna promjena od x/p (odnosno $100x/p\%$). Vidimo, da se promjena pojačanja dijeli s faktorom smanjenja pojačanja:

$$x' = \frac{x}{p} \quad (41)$$

Primjenom NR smanji se promjena pojačanja u istoj mjeri, u kojoj se smanji samo pojačanje pojačala. Na primjer: Neka promjena pojačanja kod pojačala bez NR iznosi 10% . Ako se uslijed NR pojačanje smanji 5 puta, onda će se i promjena pojačanja smanjiti 5 puta, to jest iznositi će $10/5$, dakle 2% .

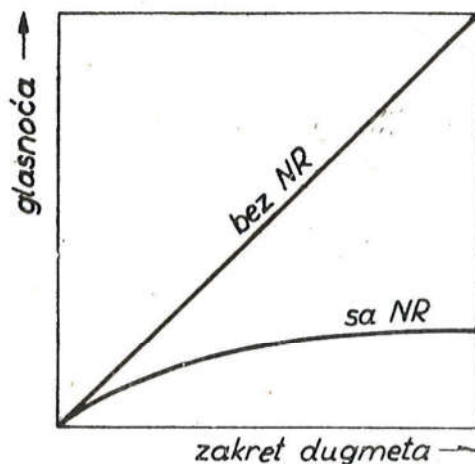
2. Primjer, u kojem je smanjenje promjene pojačanja manje nego smanjenje pojačanja. — S ovolikim smanjenjem promjene pojačanja ne možemo računati u slučaju, ako pojačalo bez NR i sa NR treba da ima jednako pojačanje. Ilustrirat ćemo to jednim primjerom. Neka jedno pojačalo ima dvije elektronke, od kojih svaka pojačava 10 puta, tako da je ukupno pojačanje 100 puta. Ako se pojačanje svake od elektronki promijeni za 10% naviše (što znači, da će pojačanje svake od njih biti $1,1$ puta veće nego prije), onda će ukupno pojačanje biti $1,1 \cdot 1,1 = 1,21$, dakle za 21% veće. Primijenimo li NR, koja će smanjiti ukupno pojačanje pojačala 10 puta (faktor smanjenja pojačanja $p = 10$), morat ćemo upotrebiti tri elektronke istog tipa, pa da opet dobijemo prijašnje pojačanje od 100 puta (tri elektronke dale bi pojačanje $10 \cdot 10 \cdot 10 = 1000$, a uz primjenu NR pojačavat će $1000/10 = 100$ puta). Pro-

mjena pojačanja kod pojačala s tri elektronke, i to bez NR, iznosila bi $1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 = 1,33$, dakle 33%, a sa NR $33/10 = 3,3\%$. Dakle: pojačalo bez NR pojačanja 100 puta imalo bi promjenu pojačanja od 21%, a drugo pojačalo istog pojačanja, ali sa NR, imalo bi promjenu od 3,3%. Promjena pojačanja ne bi bila manja 10 puta, kao što bi to odgovaralo faktoru smanjenja pojačanja, nego $21/3,3 = 6,5$ puta! Ovo nije primjer, u kojem bi se radilo o odstupanju od pravila izraženog formulom (41), jer se radi o dva pojačala, koja se uspoređuju.

3. Velik reakcioni napon — malena osjetljivost na promjene pojačanja. — Neosjetljivost pojačala na promjene u pojačanju slijedi također iz formule $A' = 1/\beta$ (formula 17). Ova formula vrijedi uz uvjet, da je faktor reakcije mnogo veći od 1, to jest da je reakcioni napon mnogo veći od napona na rešetki. U tom slučaju pojačanje pojačala praktički uopće ne ovisi o karakteristikama elektronke, to jest uopće ne ovisi o pojačanju, koje pojačalo ima bez NR, već jedino o faktoru β . Ilustrirat ćemo ovo jednim primjerom: Neka pojačalo bez NR pojačava 100 puta, a faktor β neka je $1/2$. Uz napon od 1 volta na rešetki dobiva se izlazni napon od 100 volta. U tom slučaju reakcioni napon ima vrijednost od 50 volta, a ulazni napon 51 volt, te pojačanje pojačala uz primjenu NR iznosi $100/51 (= 1,96)$. Ako se pojačanje bez NR poveća na dvostruko (na 200 puta), ili se smanji na polovinu (na 50 puta), iznositi će napon na rešetki 0,5 volta, odnosno 2 volta, da bi se dobio isti izlazni napon od 100 volta. No sa NR uz gornji faktor β pojačanje će se promijeniti samo na $100/50,5 (= 1,98)$, odnosno na $100/52 (= 1,92)$, dakle vrlo malo. Iz ovog se primjera jasno vidi, da je stabilnost pojačanja dobivena time, što su promjene napona na rešetki, koje su po svojoj apsolutnoj vrijednosti velike, malene u odnosu na reakcioni, odnosno ulazni napon. I ovdje je korist od NR, stabilnost pojačanja, plaćena gubitkom na pojačanju.

4. U pojačalo unutar petlje negativne reakcije ne smije se stavljati regulator volumena. — Upravo smo govorili o tome, kako se NR suprotstavlja svakoj promjeni pojačanja u pojačalu. To će se isto dogoditi i u slučaju, ako pojačanje mijenjamo pomoću potenciometra, kojim se regulira izlazni napon pojačala. Okrećući dugme takvog potenciometra zapravo mijenjamo ukupno pojačanje pojačala. Što je veće pojačanje, to veći će biti reakcioni napon, te promjena pojačanja ne će biti razmjerna zakretu dugmeta. Možda će nam to najbolje razjasniti dijagram na sl. 22. Kod pojačala bez NR napon će se mijenjati po pravcu I, jer tada vrijedi: koliko puta je veće pojačanje pojačala (veći zakret dugmeta), toliko puta je veći izlazni napon (uz konstantni ulazni napon). No ako je kod pojačala primijenjena NR, izlazni napon će se okretanjem dugmeta potenciometra mijenjati po onakvoj krivulji, kao što su krivulje II ili III. Opseg regulacije bit će manji, ovisno o faktoru β . To je naročito neprilično onda, kad se radi o potenciometru za reguliranje glasnoće. Ovakav potenciometar mora imati logaritmičku karakteristiku, i to zbog svojstva uha, koje jednake odnose zvučnih pritisaka osjeća kao jednake razlike u glasnoći. Ako se ovakav potenciometar stavi u pojačalo unutar petlje NR, ne će više glasnoća biti proporcionalna pomaku klizača na potenciometru, odnosno zaokretu dugmeta. Idući prema većim pojačanjima pojačalo sve sporije mijenja svoje pojačanje, kao što se to vidi iz krivulje II i III na sl. 22. To praktički znači, da će se potenciometrom glasnoća regulirati samo u

početku, kod malih jakosti glasa, a kasnije na glasnoću ne ćemo potencio-
metrom uopće moći utjecati (sl. 44.). Zato se ispravno reguliranje glasnoće
može provesti samo ispred pojačala koje je u NR, ili iza njega. Reguliranje
se može provesti i mijenjanjem faktora β , no to traži specijalni regulator (vidi
u glavi petoj primjer 14.).



Sl. 44. Kad se regulator glasnoće
uvrsti u pojačalo unutar petlje NR,
onda se glasnoća ne povisuje raz-
mjerno zakretu dugmeta.

8. Negativna reakcija može smanjiti napone smetnji u pojačalu

Naponi smetnji, kao što je na primjer napon šuštanja, koji nastaje u elektronkama, ili napon brujanja, kojemu uzrok može biti u žarenju katoda izmjeničnom strujom ili u nedostatnom filtriranju anodnog napona, mogu se smanjiti pomoću NR. Ovi naponi su novi naponi u anodnom krugu elektronke isto onako, kao što su to harmonici u izobličenom naponu. Stoga se na njih mogu primijeniti isti zaključci. Ove napone smanjuje NR u istom omjeru, u kojem se smanji pojačanje. No ovo ne vrijedi općenito, nego uz stanovita ograničenja.

1. Negativna reakcija ne može smanjiti napon šuma ulazne elektronke.

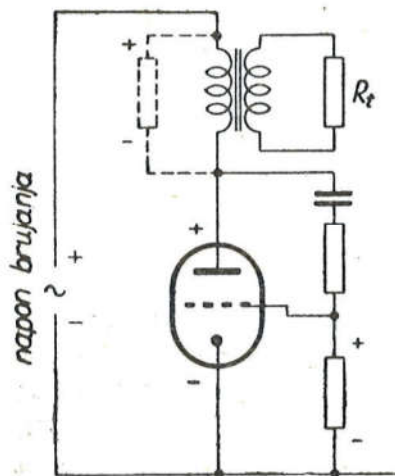
— Napon šuma u pojačalu, ukoliko dolazi od elektronke, potječe od ulazne elektronke, jer iza nje slijedi najveće pojačanje. Ovaj se napon u anodnom krugu dotične elektronke primiješa naponu signala, tako da se na izlazu elektronke nalaze oba napona jedan drugome superponirani, upravo onako, kao što su harmonici superponirani osnovnom valu u izobličenom anodnom naponu. Primijeni li se NR, dogodit će se posve slično onome, što se događa kod izobličenog napona: Napon šuma smanjit će se u istom omjeru, kao i napon signala. No time nije ništa dobiveno! Odnos napona signala prema naponu šuma ostao je isti, jer su oba napona smanjena u istom omjeru. To isto se, doduše, događa i kod harmoničkog izobličenja, samo s tom razlikom, što do izobličenja dolazi u izlaznoj elektronki, ili u bilo kojoj iza ulazne. U takvom slučaju možemo promijeniti odnos osnovnog vala prema harmonicima, i to jednostavnim povećanjem izmjeničnog napona na rešetki. Kod ulazne elektronke to nije moguće učiniti, jer je ona priključena izravno na izvor

napona (mikrofon, fotočeliju i slično), a dodavanjem nove elektronke istog tipa ispred one prve postala bi ova nova elektronka ulaznom i bila uzrokom jednakog šuma. Ako se smanjenje pojačanja ulazne elektronke, do kojeg dolazi zbog NR, u narednim stupnjevima pojačala nadoknađuje, da bi izlazni napon ostao isti, pojačava se zajedno s naponom signala i napon šuma, tako da odnos signal-šum ostaje i dalje isti.

Sve što se dobiva pomoću NR, dobiva se na račun pojačanja. To znači, da je NR-u moguće korisno primijeniti samo ondje, gdje se ulazni napon može po potrebi povisiti, na primjer, povećavanjem pojačanja u prethodnim stupnjevima pomoću dodavanja elektronke ili transformatorom. Ako se radi o pojačanju vrlo niskih napona, tako da dolazi u obzir šum elektronke, onda se napon šuma ne može smanjiti primjenom NR. U tom slučaju treba odabrati elektronku sa što manjim naponom šuma (»bešumne« pentode).

2. Negativna reakcija može smanjiti napon brujanja, koji nastaje uslijed nedostatnog anodnog filtriranja, ali ga može i povećati. — Napon brujanja, do kojeg dolazi uslijed nedovoljnog filtriranja istosmjernog napona iz ispravljača, također je novi napon u anodnom krugu superponiran naponu signala.

No u vezi sa NR postoji bitna razlika između ovog napona i onih napona, koji nastaju u elektronki (napona harmonika ili napona šuma). Dok je za ove posljednje izvor elektronka, dotle je izvor napona anodnog brujanja izvan elektronke. To je razlog, zbog kojega NR u jednom sklopu povećava, a u drugom smanjuje napon brujanja.



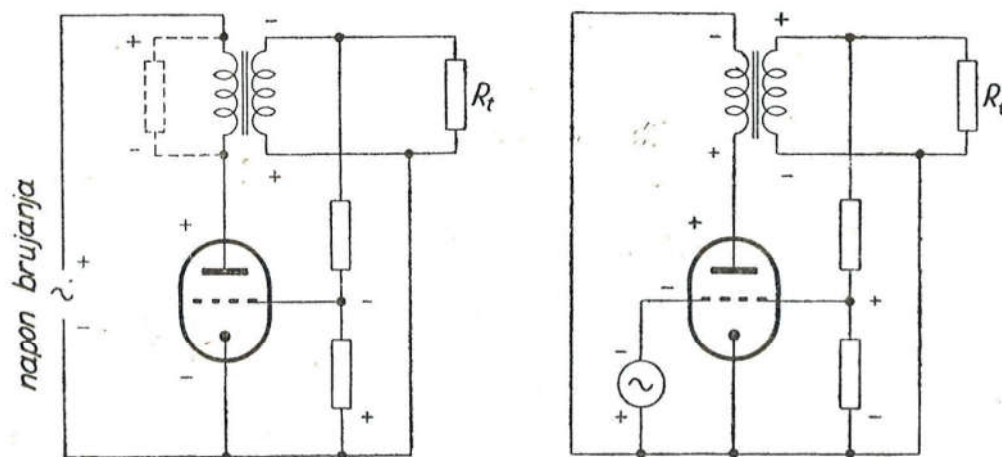
Sl. 45. U ovakvom sklopu sa NR napon brujanja na opterećenom otporu R_L veći je, nego bez NR.

Promotrimo shemu na sl. 45.! Na izvor napona brujanja priključena su dva otpora spojena u seriju. Jedan otpor je opterećeni otpor transformiran na primarnu stranu, a drugi elektronka. Napon brujanja raspodijelit će se na ove otpore u odnosu njihovih vrijednosti: na veći od njih otpad će veći, a na manji od njih manji napon. No kako znamo, naponska NR smanjuje unutarnji otpor elektronke. Da je i u ovom slučaju tako, vidi se iz jednakog predznaka na anodi i na rešetki. Kada naime, izvor napona brujanja ima prema katodi, na pri-

mjer, pozitivni poluval (kao što je naznačeno na sl. 45.), onda poluval istog predznaka vlada i na anodi i na rešetki. Rešetka u ovom slučaju potpomaže djelovanje anode, što znači da se unutarnji otpor elektronke prividno smanji. No sa smanjivanjem otpora smanjit će se i napon na njemu. Budući da je napon izvora (napon brujanja) ostao isti, to će sada veći napon nego prije (bez NR) preostati na transformatoru, odnosno na opterećenom otporu. NR izvedena na ovaj način i u ovakvom sklopu povećava napon brujanja.

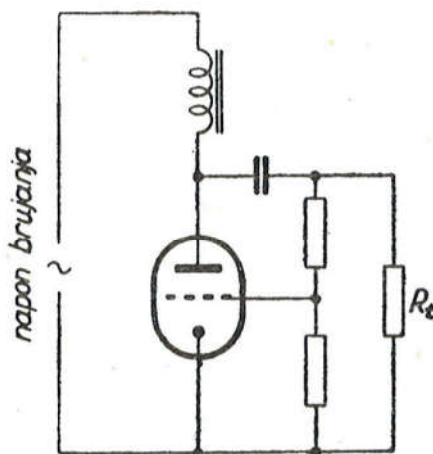
Drugačija je stvar sa NR izvedenom onako, kako pokazuje sl. 46. Budući da transformator obrće fazu, to će uz pozitivni poluval napona izvora anoda imati pozitivni poluval, ali će rešetka dobiti negativni poluval. Rešetka će odmagati anodi u djelovanju na anodnu struju, što znači, da će se unutarnji

otpor elektronke prividno povećati. Sada će elektronka zbog povećanog svog otpora preuzeti na sebe veći napon bruhanja, nego što bi ga imala bez NR, a na transformatoru, odnosno na opterećenom otporu, napon bruhanja će se smanjiti. U ovom slučaju, dakle, *NR smanjuje napon bruhanja*.



Sl. 46. NR u ovakvom sklopu smanjuje napon bruhanja na opterećenom otporu R_t . Desna slika daje kontrolu predznaka za slučaj, kad na rešetki vlada negativni poluval napona signala. Uz isti predznak na anodi u oba slučaja predznaci reakcionog napona na rešetki su različiti.

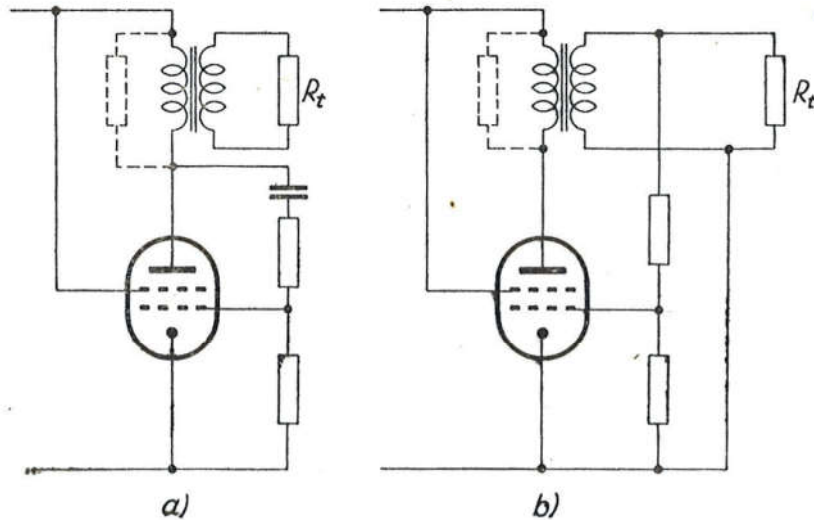
U sklopu s paralelnim napajanjem priključen je opterećni otpor elektronke paralelno (sl. 47.). Suprotno slučaju na sl. 45. ovdje smanjenje unutarnjeg otpora elektronke uslijed NR djeluje povoljno, jer je time dobiveni manji napon bruhanja na elektronki u isti čas i napon bruhanja na opterećenom otporu.



Sl. 47. U ovakvom sklopu NR smanjuje napon bruhanja na opterećenom otporu R_t .

U svim ovim sklopovima pretpostavili smo, da napon bruhanja, ako se radi o tetrodi ili pentodi, ne dolazi na zaštitnu rešetku, jer ga RC-filtar potpuno eliminira. No ako filtriranje napona bruhanja pomoću ovog filtra

nije efikasno, a pogotovu, ako se istosmjerni napon za zaštitnu rešetku uzima direktno ispred transformatora, kao što se to u praksi najčešće kod izlazne tetrode ili pentode čini (sl. 48.), onda i elektronka postane izvor napona bruhanja. Oba izvora spojena su u seriju, i djeluju istofazno, tako da se struja



Sl. 48. Napon bruhanja na zaštitnoj rešetki povećava napon bruhanja na opterećenom otporu. Također u ovakvom slučaju je sklop pod b) bolji od sklopa pod a).

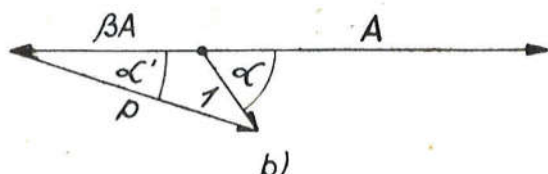
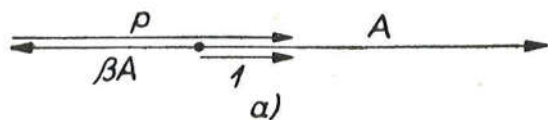
bruhanja u anodnom krugu povećava. Sklop na sl. 48a to još pogoršava, a na sl. 48b NR ne će napon bruhanja toliko smanjiti, koliko bi smanjila uz dobro filtrirani napon zaštitne rešetke.

9. Negativna reakcija smanjuje fazno izobličenje

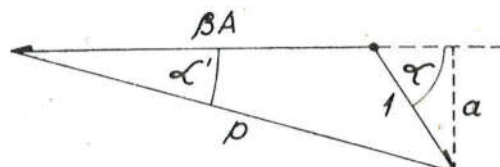
Sva naša dosadašnja izlaganja temeljili smo na jednoj važnoj pretpostavci: da je reakcioni napon *tačno u protufazi* prema ulaznom naponu. No ovo (približno) vrijedi samo za frekvencije u srednjem dijelu frekventnog pojasa, koji pojačalo prenosi. Prema krajevima prenošenog pojasa izlazni napon ne zadržava isti fazni odnos prema naponu na rešetki koji ima kod srednjih frekvencija. Prema tome će i reakcioni napon u tom području frekvencija mijenjati svoj fazni odnos prema naponu na rešetki, odnosno prema ulaznom naponu.

Fazne razlike između ulaznih i izlaznih napona u pojačalu NR također smanjuje. Kako do toga dolazi, vidi se iz vektorskog prikaza napona na sl. 49. Dok fazne razlike nema, vrijedi vektorska slika a). Vektor ulaznog napona p i vektor izlaznog napona A istog su smjera, oni su u fazi. Kad dolazi do fazne razlike, kad dakle napon rešetke s izlaznim naponom stvara kut α , onda ulazni napon zatvara s izlaznim naponom kut α' . Vidimo da je kut α' manji od kuta α . Razlika između ovih kutova je to veća, što je reakcioni napon veći prema naponu rešetke, odnosno, što je veće smanjenje pojačanja, što je jača NR.

Između smanjenja faznog kuta i smanjenja pojačanja, postoji proporcionalnost. Da vidimo, o kakvom se odnosu radi! S vrha vektora napona rešetke spustimo okomicu na pravac vektora izlaznog napona, kao što je učinjeno na



Sl. 49. a) Vektorska slika napona u pojačalu, kad nema faznog izobličenja. b) NR smanjuje fazno izobličenje.



Sl. 50. Konstrukcija za nalaženje odnosa faznih kutova.

sl. 50. Ova okomica ima dužinu a . Time smo dobili dva pravokutna trokuta: jedan s kutom α i hipotenuzom 1 , a drugi s kutom α' i hipotenuzom p , dok je kateta a zajednička. Kod ovih trokuta imamo:

$$\sin \alpha = \frac{a}{1} = a$$

$$\sin \alpha' = \frac{a}{p}$$

iz čega slijedi da je:

$$\frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha} = \frac{1}{p} \quad (42)$$

Za posve malene kutove može se uzeti da je $\sin \alpha \approx \alpha$ (okomica a jednaka je luku s radiusom 1 , odnosno s radiusom p ; kut α izražen u lučnoj mjeri), tako da imamo:

$$\frac{\alpha'}{a} = \frac{1}{p}$$

odnosno:

$$\alpha' = \frac{a}{p} \quad (43)$$

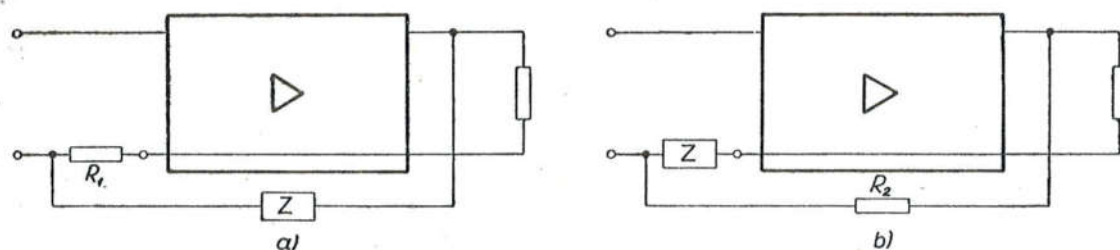
Dakle: Kad su fazne razlike malene, onda NR smanjuje fazno izobličenje u istoj mjeri, u kojoj se smanjuje pojačanje. Kod većih faznih razlika smanjenju pojačanja razmjernan je odnos sinusa kutova (formula 42).

10. Mijenjanje prigušne karakteristike pojačala pomoću negativne reakcije

U dosadašnjim razmatranjima pretpostavljali smo, da faktor β ima vrijednost neovisnu o frekvenciji. No ovaj se faktor može učiniti o frekvenciji ovisnim, čime pojačalo dobiva posebna svojstva u vezi s prigušnim izobličenjem, odnosno naponsko-frekventnom karakteristikom. Od pojačala se ne traži uvijek, da mu je naponsko-frekventna karakteristika što bliža horizontali. Često je upravo poželjno, da pojačalo ima određeno prigušno izobličenje, kako bi se, na primjer, korigiralo suprotno prigušno izobličenje nekog drugog elementa u prijenosnom lancu, ili da bi se prigušili naponi onih frekvencija, na kojima se pojavljuju smetnje. Tako je kod reprodukcije gramofonskih ploča pomoću elektromagnetske zvučnice potrebno izdignuti napone najnižih frekvencija, jer su te frekvencije iz posebnih razloga na ploči snimljene s manjim brzinskim amplitudama, nego ostale frekvencije. Kod radio-prijemnika potrebno je često regulatorom boje tona prigušiti napone viših frekvencija, jer se time smanjuju šumovi i pucketanja, i dobiva ugodniji prijem.

Hotimično prigušno izobličenje nije moguće provesti unutar petlje NR u samom pojačalu, jer, kao što smo već iznijeli, NR linearizira naponsko-frekventnu karakteristiku. No zato je to moguće učiniti pomoću onog dijela petlje, kojim se izlazni napon vraća na ulaz, dakle pomoću reakcione grane, ili » β -grane«. Ako se u ovu granu uvrste elementi, koji faktor β učine ovisnim o frekvenciji, onda i reakcioni napon, pa prema tome i pojačanje pojačala, postanu o frekvenciji ovisni.

U principu razlikujemo dva slučaja: prvi, kad je o frekvenciji ovisni elemenat »gornji« dio reakcione grane, kao na sl. 51a, i drugi, kad je »donji«



Sl. 51. Pojačalo u NR, u kojem je: a) otporna vrijednost gornjeg elementa reakcione grane ovisna o frekvenciji; b) otporna vrijednost donjeg elementa ovisna o frekvenciji.

dio reakcione grane takav elemenat, kojemu je otpor ovisan o frekvenciji (na sl. 51b). Da bismo razmatranje u što većoj mjeri pojednostavnili, pretpostavit ćemo, da je pojačanje pojačala u području frekvencija, koje nas zanima, konstantno, i da je NR vrlo jaka. Ako je, naime, stupanj NR visok, onda je reakcioni napon praktički jednak ulaznom naponu. Ova činjenica će nam biti vrlo korisna, jer ćemo umjesto ulaznog napona moći držati reakcioni napon kod svih frekvencija konstantnim, i promatrati, što se događa s izlaznim naponom pojačala u NR. Budući da je izlazni napon pojačala istodobno napon na reakcionoj grani, to će biti dovoljno, da promatramo samo reakcionu granu, odnosno da promatramo, kakav napon treba da djeluje na reakcionoj grani,

da bi se na donjem elementu reakcione grane dobio napon konstantan kod svih frekvencija. U tom slučaju, i uz gore navedenu pretpostavku da je pojačanje samog pojačala kod svih frekvencija konstantno, frekventna karakteristika napona na reakcionoj grani u isti čas je i frekventna karakteristika pojačala u NR.

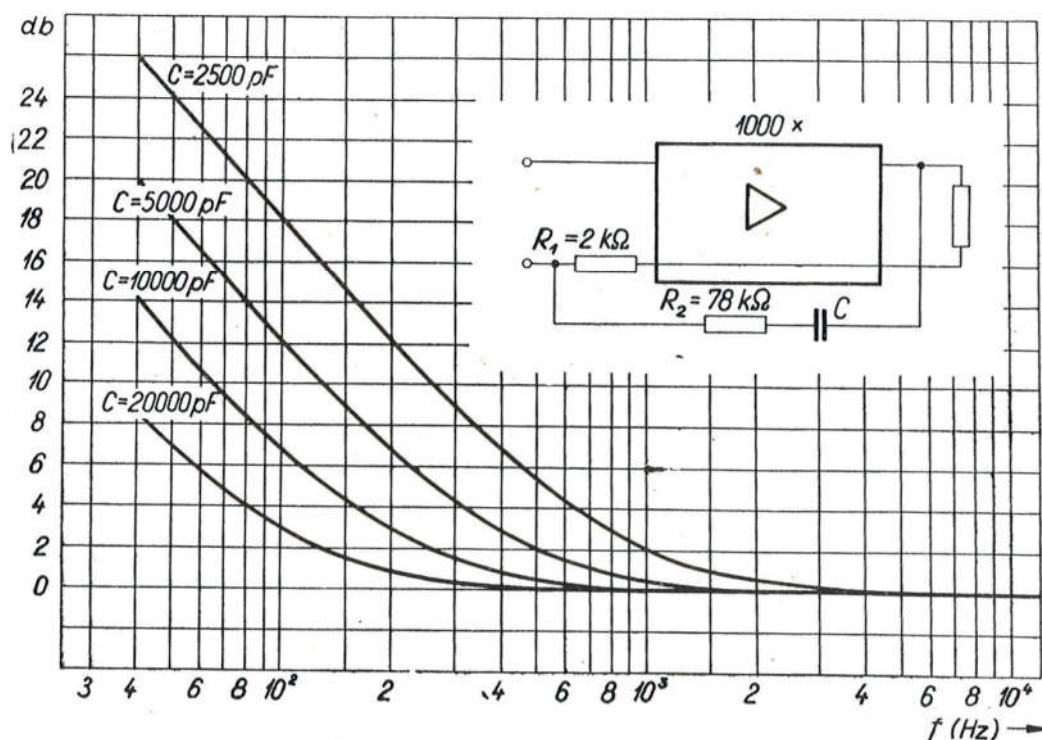
Uzmimo u razmatranje prvi slučaj, kad je gornji elemenat reakcione grane otpor ovisan o frekvenciji. Da bi napon na donjem elementu (na reakcionom otporu) bio konstantan, mora kroz njega kod svih frekvencija teći ista struja. To znači, da u slučaju, ako se mijenjanjem frekvencije impedancija Z na sl. 51a povećava, mora se i napon na reakcionoj grani (izlazni napon pojačala) povećavati. Naprotiv, ako se impedancija Z smanjuje, također ovaj napon mora se smanjivati. *Uz gornje pretpostavke, i uz NR s ovakvom reakcionom granom frekventna karakteristika impedancije reakcione grane istodobno je i prigušna karakteristika pojačala u NR.*

U drugom slučaju je donji elemenat reakcione grane otpor ovisan o frekvenciji. Uz konstantan napon na ovom elementu (na reakcionoj impedanciji) teći će kroz njega uz različite frekvencije struja različite jakosti. Ova ista struja teče i kroz gornji elemenat, kroz otpor, koji nije ovisan o frekvenciji. Uz pretpostavku, da je vrijednost ovog otpora mnogo veća od vrijednosti reakcione impedancije, možemo smatrati, da je napon na ovom otporu praktički jednak naponu na reakcionoj grani. Prema tome će se napon na reakcionoj grani, odnosno izlazni napon pojačala, mijenjati upravo onako, kako se u ovisnosti o frekvenciji mijenja struja, koja uz konstantan napon teče kroz reakcionu impedanciju. *Uz gornje pretpostavke, i uz NR s ovakvom reakcionom granom, pojačalo u NR ima istu prigušnu karakteristiku, kakvu ima reakciona admitancija.*

1. Izdizanje naponâ niskih frekvencija pomoću negativne reakcije. — Najjednostavniji sklop, pomoću kojeg se kod pojačala u NR može dobiti izdizanje napona niskih frekvencija, vidi se na sl. 52. U β -granu uvršten je u seriju s otporima R_1 i R_2 kondenzator C . Ako je kapacitet kondenzatora tako velik, da je njegov kapacitivni otpor i kod najnižih frekvencija, koje pojačalo prenosi, vrlo malen prema zbroju otpora ($R_1 + R_2$), onda ovaj kondenzator ne će na prigušnu karakteristiku pojačala u NR nimalo utjecati, djelovat će, kao da je na tom mjestu kratki spoj. No to nije slučaj, koji nas ovaj čas zanima. Mi ćemo odabrati takav kondenzator, da će njegov kapacitivni otpor kod niskih frekvencija biti približno veličine istoga reda kao zbroj otpora ($R_1 + R_2$). Kod srednjih i visokih frekvencija kapacitivni otpor ovakvog kondenzatora bit će prema otporu ($R_1 + R_2$) neznatan, te u tom području frekvencija ne će biti potrebno o njemu posebno voditi računa. Iz ovoga slijedi, da će kod srednjih i visokih frekvencija faktor β biti veći, nego kod niskih frekvencija, te će prema tome i reakcioni napon biti veći, odnosno pojačanje pojačala manje. *Reakciona grana s ovakvim svojstvima djelovat će na pojačalo tako, da će naponi niskih frekvencija biti u odnosu na napone kod srednjih i visokih frekvencija izdignuti, i to u toliko više, što je frekvencija niža.*

Razmotrit ćemo pobliže, kakva će biti prigušna karakteristika pojačala uz ovakvu NR. Pri tome ćemo uzeti u obzir pretpostavke, koje smo prije postavili. Kod srednjih i visokih frekvencija stvar je jednostavna. Budući da kondenzator u ovom području frekvencija nema utjecaja, to će pojačanje poja-

čala u NR biti određeno odnosom otpora R_1 prema zbroju otpora ($R_1 + R_2$). Radi jednostavnosti uzet ćemo, da je otpor R_2 mnogo veći od otpora R_1 , što je u praksi najčešće slučaj. Tada je napon na otporu R_2 praktički jednak izlaznom naponu. Da vidimo, što imamo u slučaju, kad je kapacitivni otpor kondenzatora jednak otporu R_2 . Kako se radi o vektorskom zbrajanju, to će impedancija ovog serijskog spoja sastavljenog od kapaciteta C i otpora R_2 biti kod dotične frekvencije približno 1,4 puta veća bilo od kapacitivnog



Sl. 52. Pojačalo sa NR, koja izdiže napone niskih frekvencija. Kod mjerenja svih karakteristika otpori R_1 i R_2 ostali su isti.

otpora kondenzatora, bilo od otpora R_2 . Da bi napon na otporu R_1 ostao, kao što je dogovoreno, isti kao prije, treba da kroz njega teče struja prijašnje jakosti. Uz impedanciju, koja je 1,4 puta veća nego prije, struja će imati prijašnju vrijednost onda, ako se i napon na impedanciji poveća 1,4 puta. Drugim riječima: kod frekvencije, kod koje se kapacitivni otpor kondenzatora C izjednači s otporom R_2 , izlazni napon pojačala je za 40% ili za 3 decibela viši od napona kod srednjih i visokih frekvencija.

Idući u područje još nižih frekvencija prevladava u sve većoj mjeri kapacitivni otpor, te na koncu praktički on sam predstavlja impedanciju reakcione grane (u vektorskoj slici hipotenuza postaje praktički jednaka kateti). U tom području frekvencija kapacitivni otpor, pa prema tome i izlazni napon pojačala, postaju dva puta veći, kad se frekvencija smanji na pola. Uspon prigušne karakteristike je, dakle, 6 decibela po oktavi.¹⁾

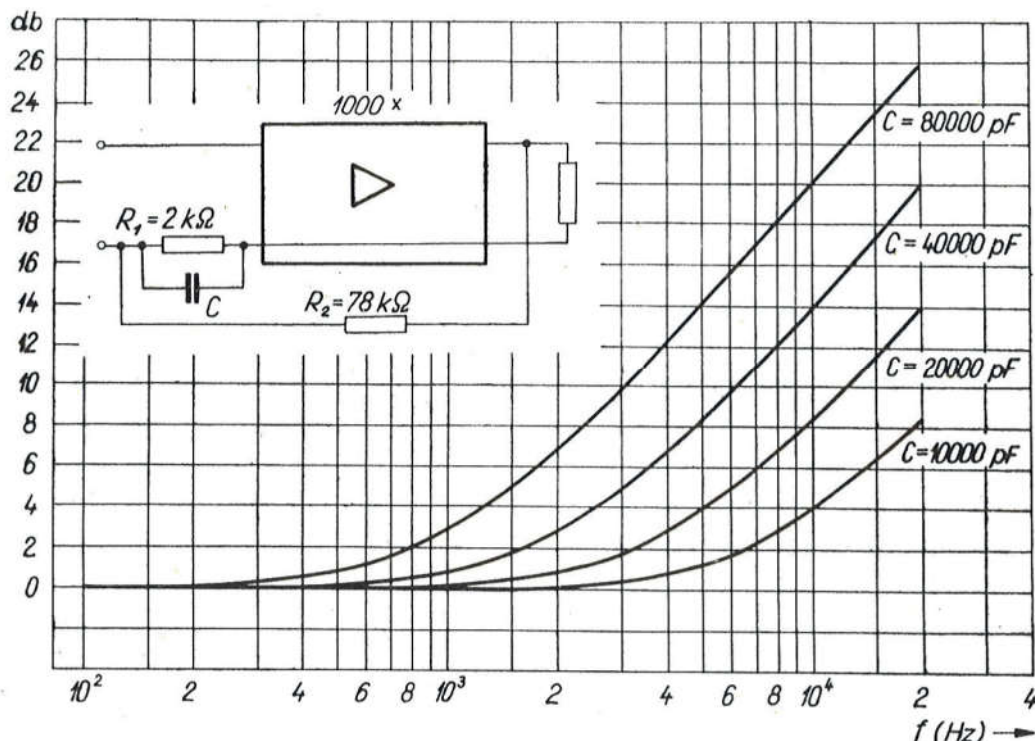
Promjenom kapaciteta C ili otpora R_2 promijenit će svoje mjesto uzlazni dio krivulje. Što je uz dani otpor R_2 kapacitet C manji, ili, što je uz dani

¹ Kad se dvije frekvencije odnose kao 1 : 2, odnosno 2 : 1, onda se one razlikuju za oktavu. Na primjer, frekvencija 2000 Hz za oktavu je viša, a frekvencija 500 Hz za oktavu niža od frekvencije 1000 Hz.

kapacitet C otpor R_2 manji, to će se više uzlazni dio krivulje pomaknuti prema višim frekvencijama.

Dijagram na sl. 52. pokazuje, kakav se pomak dobiva udvostručivanjem kapaciteta. Mijenjanjem otpora R_2 mijenja se u isti čas i faktor β , dakle i pojačanje pojačala kod srednjih i visokih frekvencija, što je nezgodna strana ovog načina pomicanja uzlaznog dijela karakteristike. Na strminu izdizanja može se uz dani otpor R_2 i kapacitet C utjecati pomoću otpora spojenog paralelno kapacitetu. Što je ovaj otpor manji, to manji utjecaj će imati kapacitet, te će izdizanje biti polaganije, strmina krivulje manja.

2. Izdizanje naponâ visokih frekvencija pomoću negativne reakcije. — Kao što smo slabeći reakcioni napon kod niskih frekvencija dobili izdizanje napona tih frekvencija, tako na isti način možemo to postići i kod visokih frekvencija. U tu svrhu dodat ćemo paralelno otporu R_1 kondenzator C , kao što je učinjeno u shemi na sl. 53.



Sl. 53. Pojačalo sa NR, koja izdiže napone visokih frekvencija. Sve karakteristike su mjerene uz iste otpore R_1 i R_2 .

Da bismo odredili oblik prigušne karakteristike, poslužiti ćemo se i ovdje onom pretpostavkom, uz koju reakcioni napon možemo smatrati jednakim ulaznom naponu. Otpor R_2 je obično mnogo veći od otpora R_1 , te će prema tome izlazni napon pojačala biti zapravo pad napona na otporu R_2 . Kakva će biti frekventna karakteristika ovog napona, ovisi o tome, kako se u ovisnosti o frekvenciji uz konstantan napon mijenja struja, koja teče kroz impedanciju $R_1 - C$.

U području niskih i srednjih frekvencija kapacitivni otpor je relativno velik, te struju, koja teče kroz impedanciju $R_1 - C$, određuje samo otpor R_1 . Kod frekvencije, kod koje se kapacitivni otpor izjednači s otporom R_1 , struja

je 1,4 puta veća, nego u slučaju bez kapaciteta. Ova struja teče i kroz otpor R_2 , pa prema tome i napon na ovom otporu mora biti 1,4 puta veći nego prije. Kod dotične frekvencije imamo, dakle, izdizanje napona od 40% ili za 3 decibela. Idući prema višim frekvencijama impedancija R_1-C sve više ovisi o kapacitivnom otporu, tako da na koncu praktički sam kapacitivni otpor kondenzatora određuje vrijednost impedancije. U ovom području frekvencija struja će uz dvostruko višu frekvenciju biti dva puta veća, a to znači, da će *frekventna karakteristika napona na otporu R_2 imati uspon od 6 decibela po oktavi*.

Povećavanjem kapaciteta C ili povećavanjem otpora R_1 pomiče se uzlazni dio krivulje prema nižim frekvencijama. Iz krivulje na sl. 53. se vidi, kako se krivulja pomiče, kad se kapacitet udvostručuje. Promjenom otpora R_1 promijeni se faktor β također za niske i srednje frekvencije. Strmina uspona krivulje može se smanjiti uvrštavanjem otpora u seriju s kondenzatorom. Što je ovaj otpor veći, to je strmina karakteristike manja.

3. Prigušivanje naponâ niskih frekvencija pomoću negativne reakcije.

— Da bi se dobilo spuštanje naponske frekventne karakteristike pojačala u području niskih frekvencija, treba reakcioni napon kod niskih frekvencija učiniti većim, nego kod srednjih i visokih frekvencija. Shema na sl. 54. prikazuje sklop, u kojem se dobiva takva NR. Serijska impedancija R_1-C povećava se u većoj mjeri tek kod niskih frekvencija. Zbog toga se u tom području frekvencija povećava faktor β , te dolazi do slabljenja izlaznog napona, odnosno do spuštanja prigušne karakteristike.

I ovdje ćemo uzeti, da je otpor R_2 mnogo veći od otpora R_1 , iz čega slijedi, da je pad napona na otporu R_2 praktički jednak izlaznom naponu pojačala. Frekventna karakteristika ovog napona ovisiti će o tome, kako se u ovisnosti o frekvenciji mijenja struja, koja uz konstantan napon teče kroz impedanciju R_1-C . Također ovdje ćemo, naime, primijeniti prijašnju pretpostavku, prema kojoj reakcioni napon možemo smatrati ulaznim naponom. Kod srednjih i visokih frekvencija kapacitivni otpor je relativno malen, te je NR određena odnosom otpora R_1 prema zbroju $(R_1 + R_2)$. Kad se kod jedne od niskih frekvencija kapacitivni otpor kondenzatora C izjednači s otporom R_1 , postaje impedancija R_1-C veća 1,4 puta od pojedinačnog otpora. Uz isti napon kao prije teći će kroz ovu impedanciju u ovom slučaju struja, koja je toliko puta manja, koliko puta je impedancija veća. Kako ova struja teče i kroz otpor R_2 , to će na ovom otporu uz struju manju 1,4 puta i napon biti toliko puta manji. Dakle, kod frekvencije, kod koje se kapacitivni otpor izjednači s otporom R_1 , izlazni napon pojačala u NR padne na vrijednost, koja je 1,4 puta manja, nego u području srednjih i visokih frekvencija. *Prigušna karakteristika se u toj točki spusti za 3 decibela*.

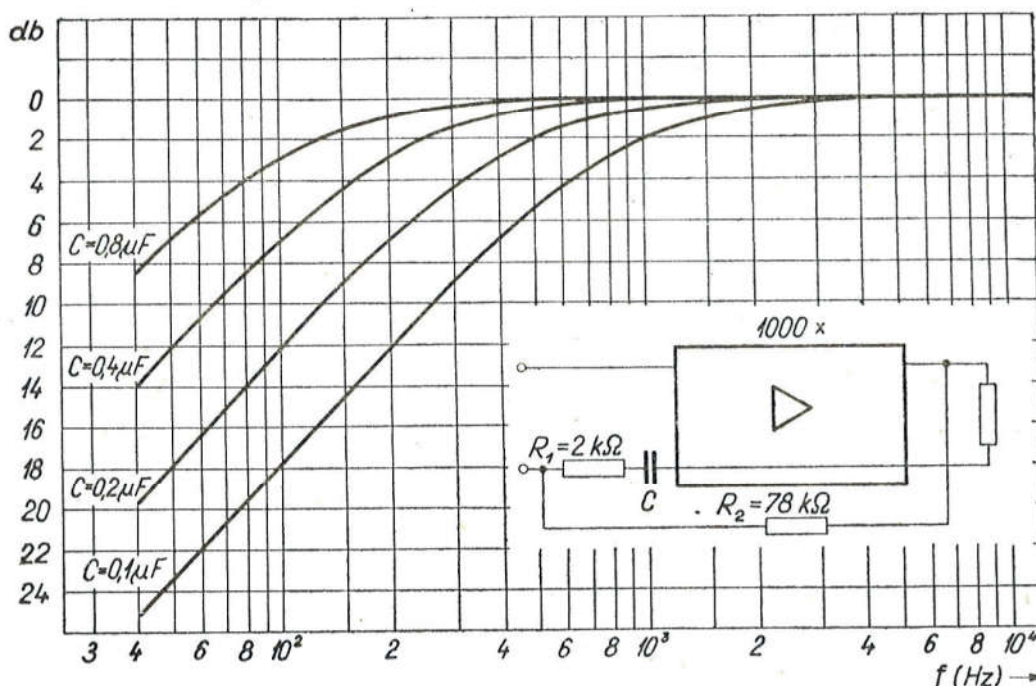
Kod još nižih frekvencija sve više prevladava kapacitivni otpor. Kod dovoljno niskih frekvencija utjecat će na vrijednost struje praktički samo kondenzator C . Budući da se radi o konstantnom naponu to će u tom području frekvencija struja biti dva puta manja, kad se frekvencija smanji na polovinu. To isto dogodit će se i s naponom na otporu R_2 . *Prema tome izlazni napon će opadati za 6 decibela po oktavi*.

Povećanjem kapaciteta C , odnosno povećanjem otpora R_1 , pomiče se silazni dio krivulje prema nižim frekvencijama. Na sl. 54. to je postignuto

mijenjanjem kapaciteta, koji je ovdje podvostručivan. Ako se ovo dobiva mijenjanjem otpora R_1 , onda se time mijenja i stupanj NR u području konstantnog pojačanja. Strmina spuštanja prigušne karakteristike može se smanjiti dodavanjem otpora paralelno kapacitetu. Što je ovaj otpor manji, to je i strmina spuštanja manja.

4. Prigušivanje naponâ visokih frekvencija pomoću negativne reakcije.

— Spuštanje prigušne karakteristike pojačala kod visokih frekvencija može se postići sklopom, koji vidimo na sl. 55. Impedancija spoja R_2-C postaje u području visokih frekvencija manja, zbog čega se pojačava NR i smanjuje pojačanje kod tih frekvencija. Na temelju razmatranja, koje je posve ana-

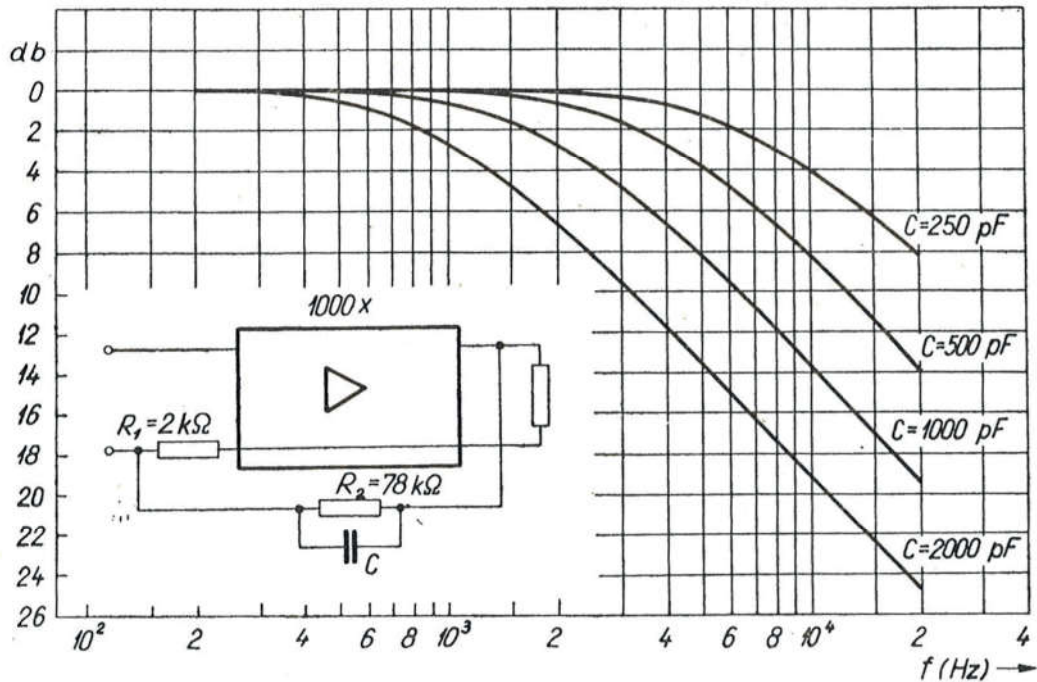


Sl. 54. Pojačalo sa NR, koja prigušuje napone niskih frekvencija. Mjerenje karakteristika izvršeno je uz iste otpore R_1 i R_2 za sve vrijednosti kapaciteta.

logno onome u prethodnim odsjecima, možemo naći, kakav će biti tok frekventne karakteristike izlaznog napona. Ako je otpor R_2 mnogo veći od otpora R_1 , prigušna karakteristika pojačala ovisit će praktički samo o impedanciji R_2-C . Iz toga slijedi, da će do snizivanja izlaznog napona za 30% ili za 3 decibela doći kod one frekvencije, kod koje se kapacitivni otpor kondenzatora C izjednači s otporom R_2 . Kod dovoljno visokih frekvencija ovisit će jakost struje praktički samo o kapacitivnom otporu, te će se prema tome kod tih frekvencija izlazni napon pojačala spuštati za 6 decibela po oktavi.

Povećanjem kapaciteta C ili povećanjem otpora R_2 pomiče se silazni dio krivulje na lijevo. Na sl. 55. pomak je postignut mijenjanjem kapaciteta, koji je udvostručivan. Strmina spuštanja krivulje može se smanjiti uvrštavanjem otpora u seriju s kapacitetom. Što je otpor veći, to je strmina karakteristike manja.

5. Induktivitet umjesto kapaciteta. — Na oblik prigušne karakteristike može se utjecati i uvrštavanjem induktiviteta u reakcionu granu pojačala. Na temelju razmatranja sličnog onome, koje smo proveli u vezi s kapacitetom u reakcionoj grani, može se lako izvesti zaključak, da će odgovarajući induktivitet spojen na mjestu kapaciteta C u shemi na sl. 52. uzrokovati izdizanje napona visokih frekvencija. Naprotiv, stavljanjem odgovarajućeg induktiviteta na mjesto kapaciteta u shemi na sl. 53. dobiva se izdizanje napona niskih frekvencija. Prigušivanje napona visokih frekvencija dobiva se induktivitetom na mjestu kapaciteta u shemi na sl. 54., a prigušivanje napona niskih frek-



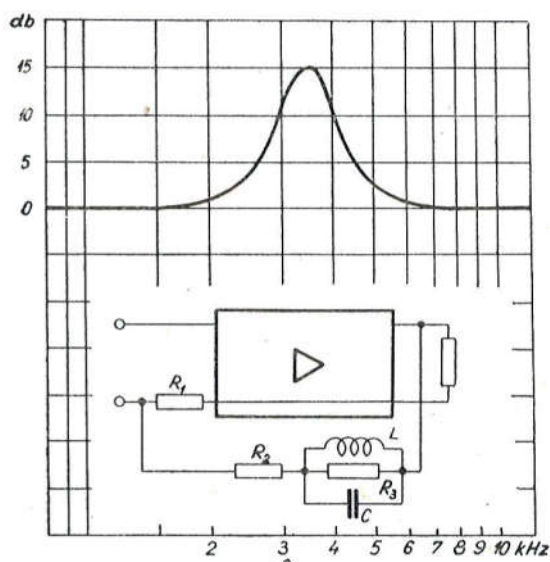
Sl. 55. Pojačalo sa NR, koja prigušuje napone visokih frekvencija. Kod mjerenja karakteristika otpori R_1 i R_2 bili su u svim slučajevima isti.

vencija induktivitetom na mjestu kapaciteta u shemi na sl. 55. Što se tiče reguliranja izdizanja, odnosno spuštanja prigušne karakteristike, vrijedi isto, što je rečeno u vezi s kapacitetom u reakcionoj grani.

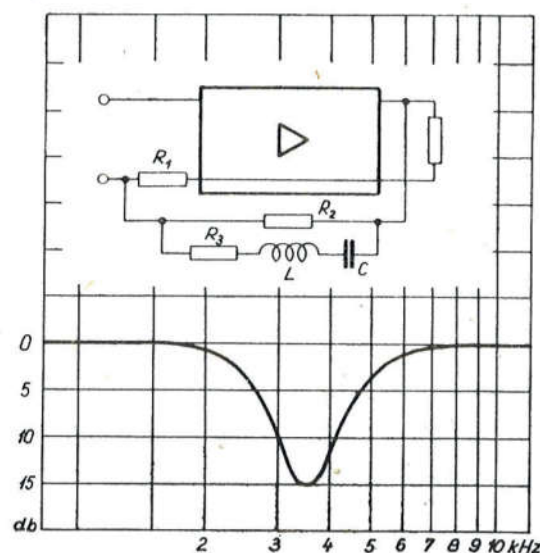
6. Uz malen odnos otporâ R_2/R_1 strmina karakteristike je manja. — Uz pretpostavku da je otpor R_2 mnogo veći od otpora R_1 , imali smo kod frekvencije izjednačenja kapacitivnog i radnog otpora izdizanje, odnosno spuštanje napona za 3 decibela. No kad se otpor R_2 približi vrijednosti otpora R_1 , tada je izdizanje, odnosno spuštanje, manje od 3 decibela. Uz jednake otpore ($R_2 = R_1$) izdizanje, odnosno spuštanje, iznosi 2 decibela. Kad je otpor R_2 dva puta veći od otpora R_1 , ova se vrijednost poveća na 2,5 decibela. Uz sve otpore R_2 , koji su više od pet puta veći od otpora R_1 , izdizanje, odnosno spuštanje kod frekvencije izjednačenja iznosi 3 decibela. To znači, da za sve ove slučajeve ($R_2 \geq 5R_1$) vrijedi pravilo, prema kojem je frekventna karakteristika impedancije, odnosno admitancije kompleksnog otpora u reakcionoj grani istodobno i prigušna karakteristika pojačala u NR (uz pretpostavku o konstantnom pojačanju pojačala i o jakoj NR).

Strmina krivulje smanjuje se, kao što smo napomenuli, također dodavanjem radnog otpora paralelno kapacitetu (kod sklopa za izdizanje i spuštanje napona niskih frekvencija), odnosno dodavanjem radnog otpora u seriju kapacitetu (kod sklopa za izdizanje i spuštanje napona visokih frekvencija). No ovo vrijedi samo za početni dio krivulje, u kojem se ona diže, odnosno spušta. Kod dovoljno niskih, odnosno dovoljno visokih frekvencija postaje kapacitivni otpor u takvim sklopovima s obzirom na utjecaj zanemariv, te u reakcionoj grani djeluju samo otpori neovisni o frekvenciji. U tom frekventnom području pojačanje je praktički konstantno, odnosno frekventna karakteristika napona je horizontala.

7. Izdizanje, odnosno prigušivanje napona jednog pojasa frekvencija. — Uvrštavanjem paralelnog titrajnog kruga u »gornji dio« reakcione grane, kao u shemi na sl. 56., dobiva se izdizanje napona u jednom pojasu frekvencija. U području oko rezonantne frekvencije impedancija titrajnog kruga je uz dovoljno malene gubitke u krugu određena praktički samo otporom R_3 , te je



Sl. 56. Izdizanje napona jednog pojasa frekvencija pomoću NR.



Sl. 57. Prigušivanje napona jednog pojasa frekvencija pomoću NR.

faktor β dan odnosom otpora R_1 prema zbroju sva tri otpora ($R_1 + R_2 + R_3$). Ispod izdignutog pojasa (kod nižih frekvencija) induktivitet šuntira otpor R_3 , te se NR pojača, odnosno pojačanje pojačala u NR smanji. Iznad izdignutog pojasa (kod viših frekvencija) to isto uzrokuje kapacitet C .

Uvrštavanjem serijskog titrajnog kruga u »gornji dio« reakcione grane, kao u shemi na sl. 57., dobiva se prigušivanje napona u stanovitom pojasu frekvencije. Ako su gubici u krugu dovoljno maleni, onda je u području oko rezonantne frekvencije impedancija titrajnog kruga određena praktički samo otporom R_3 . U ovom frekventnom području se otpor R_3 dodaje paralelno otporu R_2 , i ova dva otpora čine »gornji dio« reakcione grane. Izvan prigušenog frekventnog pojasa postaje impedancija titrajnog kruga vrlo velika (kod nižih frekvencija zbog kapacitivnog otpora, a kod viših zbog induktivnog otpora), tako da u »gornjem dijelu« reakcione grane djeluje praktički samo otpor R_2 , zbog čega se NR smanji, odnosno pojačanje pojačala u NR poveća.

11. Izlazna snaga i negativna reakcija

Snaga, što je daje neki generator, ovisi o odnosu opteretnog otpora prema unutarnjem otporu generatora. I kod elektronke, budući da je i ona generator, mora opretetni otpor biti prema unutarnjem otporu u stanovitom odnosu, da se uz *dopušteno izobličenje* dobije što veća snaga. Kako NR prividno mijenja unutarnji otpor elektronke, treba postaviti pitanje, što je u tom slučaju s izlaznom snagom?

U glavi prvoj, poglavlje 2. vidjeli smo, kako NR mijenja karakteristike elektronke. Do promjene karakteristika dolazi zbog toga, što se one crtaju u odnosu na ulazni napon, a ne u odnosu na napon rešetke. Prema tome radi se o prividnoj promjeni, jer karakteristike u odnosu na napon rešetke ostaju i dalje iste, kao bez NR. No za izlaznu snagu je mjerodavan napon rešetke, jer izmjenična komponenta anodnog napona i struje ovisi o izmjeničnom naponu, rešetke.

Izlazna snaga elektronke kao pojačala u klasi A ograničena je anodnim naponom mirovanja i anodnom strujom mirovanja. Kako anodni napon ne može poprimiti negativne vrijednosti, to su maksimalne amplitude izmjenične komponente anodnog napona ograničene vrijednošću anodnog napona mirovanja. Anodna struja također ne može biti negativna, to jest ne može teći u smjeru, koji je suprotan normalnom, te stoga najveće amplitude izmjenične komponente anodne struje mogu biti najviše jednake anodnoj struji mirovanja.

Uz opteretne otpore R_a , koji su manji od optimalnog opteretnog otpora dotične elektronke (pentode), snaga je ograničena anodnom strujom mirovanja I_a i dana je sa $\frac{1}{2} I_a^2 R_a$. Kod opteretnih otpora većih od optimalnog snaga je ograničena anodnim naponom mirovanja, i dana je sa $\frac{1}{2} U_a^2 / R_a$. Uz optimalni otpor $R_a = U_a / I_a$ elektronka daje najveću snagu, koja je jednaka $\frac{1}{2} U_a \cdot I_a$.¹

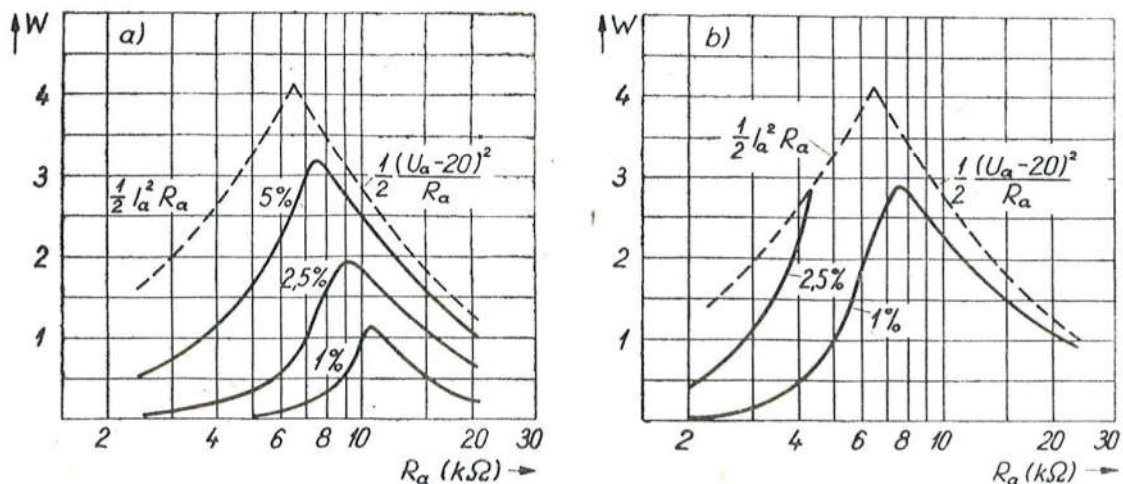
Sve što je gore rečeno, odnosi se na izlaznu pentodu (ili tetrodu). Kod izlazne triode se ne može kao kod izlazne pentode iskoristiti cijeli anodni napon mirovanja za izmjeničnu komponentu. No izlazna trioda se ionako vrlo rijetko upotrebljava u vezi sa NR, jer nije tako osjetljiva kao pentoda (za pobuđivanje su joj potrebni veliki izmjenični naponi). Pentoda osim toga ima veći stupanj djelovanja. Nedostatak pentode, što ima velik unutarnji otpor, može se lako otkloniti, i to upravo NR-om, jer i razmjerno malena naponska NR smanjuje unutarnji otpor izlazne pentode na vrijednost, koju ima izlazna trioda. Zato ćemo se u ovim našim razmatranjima ograničiti samo na pentodu. No svi zaključci, do kojih ćemo doći u vezi s izlaznim pentodom, vrijede u principu i za izlaznu triodu.

Naše razmatranje još ćemo i dalje suziti, i to tako, što ćemo promatrati ponašanje pentode samo uz naponsku NR. Kad se radi o pogonu zvučnika, onda je vrlo važno, da izlazni otpor pojačala bude što manji, kako bi u što većoj mjeri bilo prigušeno slobodno titranje membrane. Za takve slučajeve ne dolazi u obzir strujna NR, jer ona povećava unutarnji otpor elektronke.

1. Izlazna snaga i negativna reakcija uz opterećenje radnim otporom. — U dijagramu na sl. 58.a prikazana je ovisnost izlazne snage elektronke AL 4 o

¹ Sve ovo vrijedi zapravo za idealnu pentodu, to jest takvu, kojoj bi anodne karakteristike bile horizontale jednakog međusobnog razmaka povučene od ordinate na desno.

opteretnom otporu uz konstantan faktor harmoničkog izobličenja od 1%, 2,5% i 5%. Crtkana linija predstavlja granicu, koju određuje vrijednost nula anodne struje i 20 volta anodnog napona. Ovdje nije kao granica uzeta vrijednost nula anodnog napona, već 20 volta, budući da su kod pentode anodno-naponske karakteristike ispod nekih 20 volta anodnog napona jako zakrivljene, tako da to područje ne dolazi u obzir za iskorištavanje. Vrijednosti snage, koje bi ležale iznad crtkane krivulje, ne bi imale nikakvo značenje za praksu, jer bi pri tom dolazilo do takvog harmoničkog izobličenja, kod kojeg faktor izobličenja nije mjera za akustičku kvalitetu.

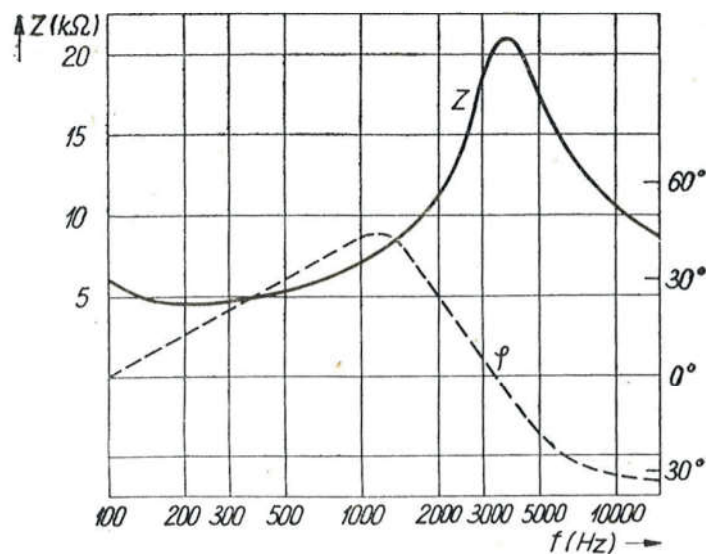


Sl. 58. a) Ovisnost izlazne snage kod elektronke AL 4 o opteretnom otporu, uz konstantne faktore harmoničkog izobličenja, bez primjene NR; b) uz primjenu naponske NR, koja smanjuje pojačanje 4,5 puta.

Usporedimo dijagram na sl. 58.a s dijagramom na sl. 58.b, koji vrijedi za slučaj, kad je ista elektronka u naponskoj NR, i to uz faktor smanjenja pojačanja $p = 4,5$. Krivulja, koja na sl. 58.a vrijedi za faktor izobličenja od 5%, ne razlikuje se mnogo od krivulje na sl. 58.b, koja vrijedi za faktor izobličenja od 1%, naročito kod većih opteretnih otpora. Već ovako malena NR omogućuje, da se, ne prelazeći mnogo faktor izobličenja od 1%, elektronka pobudi do graničnog anodnog napona (do granične snage $\frac{1}{2}[U_a-20]^2/R_a$).

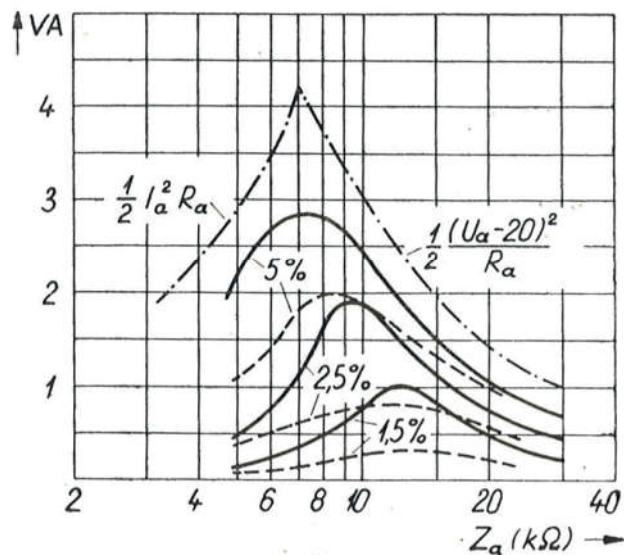
2. Izlazna snaga i negativna reakcija uz opterećenje kompleksnim otporom. — U praksi se izlazna elektronka rijetko opterećuje čistim radnim otporom. Mnogo je češće elektronka opterećena zvučnikom, dakle impedancijom, kojoj se vrijednost mijenja s frekvencijom. Kako se radi o opterećenju sastavljenom od radnih i reaktivnih elemenata, dolazi do fazne razlike između napona, koji vlada na titrajnoj zavojnici, odnosno na primarnom namotu transformatora, i struje, koja teče kroz titrajnu zavojnicu, odnosno kroz primarni namot transformatora. Na sl. 59. prikazana je ovisnost impedancije i faznog kuta o frekvenciji kod normalnog zvučnika. U radio-prijemnicima se obično primarnom namotu izlaznog transformatora dodaje paralelno kondenzator od kojih 2000 pF, zbog čega se smanjuje impedancija iznad nekoliko hiljada herca, a također se mijenja predznak faznog kuta, što se također vidi iz dijagrama.

Da vidimo, kako stoji s izlaznom snagom elektronke, kad je ona optećena kompleksnim otporom, impedancijom. Radi veće jednostavnosti uzet ćemo, da je impedancija sastavljena od takvog serijskog sklopa radnog otpora i induktiviteta, da fazni kut iznosi 45° ($\cos \varphi = 0,7$). Iz dijagrama na sl. 59.



Sl. 59. Karakteristike impedancije i faznog kuta kod normalnog zvučnika. Paralelno primaru transformatora spojen je kapacitet od 2000 pF.

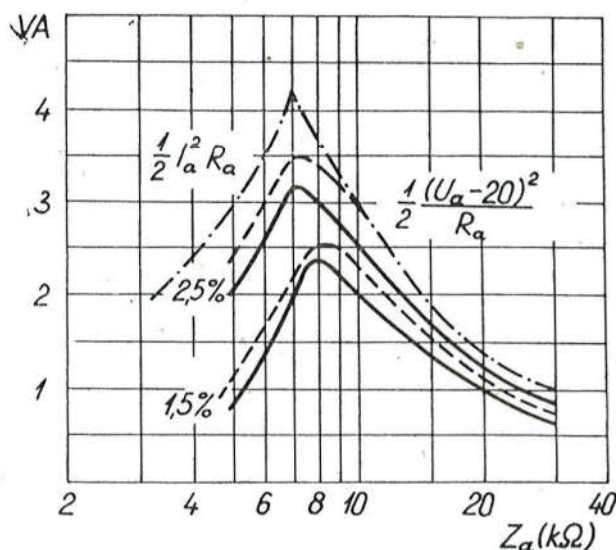
vidi se, da s ovakvim faznim kutom radi dotični zvučnik kod 1000 herca. Izlazna pentoda EL 3 opterećena ovakvom impedancijom, a također posebno čistim radnim otporom, daje izlazne snage, koje u ovisnosti o opterećenoj impedanciji, odnosno otporu, prikazuje dijagram na sl. 60. Naznačeni faktori



Sl. 60. Karakteristike izlazne snage kod elektronke EL 3, uz opterećenje radnim otporom (izvučene krivulje), i kompleksnim otporom (crtkane krivulje), bez primjene NR.

izobličenja od 1,25%, 2,5% i 5% odnose se na izobličenu anodnu struju, a izlazna snaga kod opterećenja impedancijom nije radna snaga $\frac{1}{2} U_a I_a \cos \varphi$, nego prividna snaga $\frac{1}{2} U_a I_a$. Kao što se iz dijagrama vidi, izlazna snaga je uz isto izobličenje znatno manja, ako postoji fazni pomak između napona i struje. To dolazi od toga, što uz opterećenje impedancijom radna karakteristika nije pravac, kao kod radnog otpora, već eliptična krivulja, zbog čega je izobličenje uz inače iste uvjete veće, odnosno snaga uz isto izobličenje manja.

Tako stoji stvar bez NR. No primjenom NR prilike se znatno poboljšavaju. Dijagram na sl. 61., koji je dobiven mjerenjem također na elektronki



Sl. 61. Kao na sl. 60., ali s elektronkom EBC 3 kao pretpojačalom i uz naponsku NR, koja smanji pojačanje 4 puta.

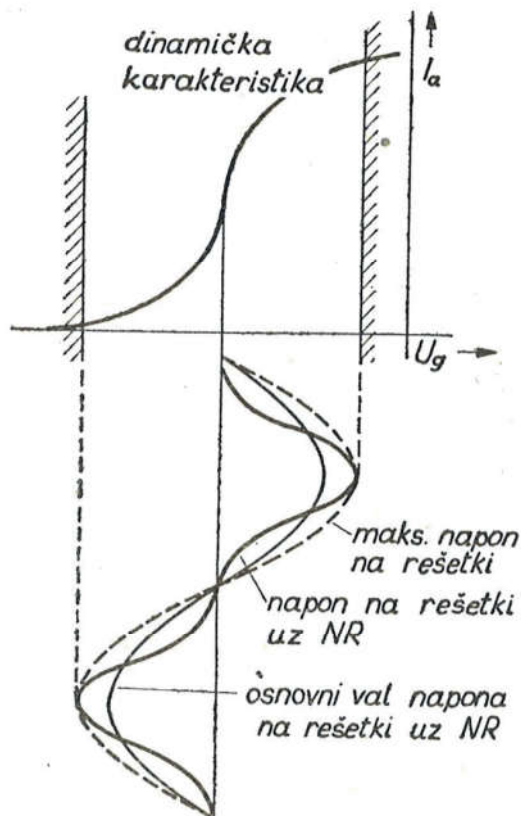
EL 3, i to u kombinaciji s elektronkom EBC 3 kao pretpojačalom, i uz četverostruku naponsku NR ($p = 4$), pokazuje, da je izlazna snaga uz isto izobličenje čak veća, kad je opterećenje kompleksno, nego kad je čisto radno. NR dakle poništava utjecaj faznih razlika na izlaznu snagu. Ovo dakako ne će vrijediti i za takvu opteretnu impedanciju, kod koje je reaktivna komponenta u odnosu na radnu vrlo velika (fazni kut velik). U tom slučaju je radna karakteristika široka elipsa, kojoj se vrh ne može smjestiti daleko u šiljati kut, što ga čini apscisa s radnim pravcem.

3. Negativna reakcija ne traži promjenu opteretne impedancije. — Iz dijagrama na sl. 60. i 61. možemo izvesti još jedan važan zaključak: *Maksimalna snaga uz stanovito izobličenje dobiva se opterećivanjem istim otporom, odnosno impedancijom, bila primijenjena NR ili ne.* Prividna promjena unutarnjeg otpora izlazne elektronke u NR ne povlači za sobom promjenu opteretnog otpora, odnosno impedancije.

U akustici se najvažnije frekventno područje nalazi oko 1000 herca, jer ono ima najveći udio u ukupnoj glasnoći. Zato kod prilagođivanja zvučnika na izlaznu elektronku treba izlazni transformator da ima takav omjer zavoja, da impedancija koju zvučnik ima kod 1000 herca, transformirana na

primarnu stranu, ima vrijednost optimalnog opterećenog otpora elektronke. Iz gornjih dijagrama se vidi, da za dobivanje najveće snage uz dovoljno maleno izobličenje optimalni opterećni otpor elektronke EL 3 u slučajevima bez NR i sa NR iznosi 7000 oma.

4. Izlazna snaga se smanjuje primjenom negativne reakcije. — Najveća snaga, koju uz dopušteno izobličenje može dati izlazna elektronka, određena je između ostaloga maksimalnom amplitudom napona na rešetki. Ovu amplitudu ograničuje s jedne strane nulta



Sl. 62. Kod pojačala, koje ima dinamičku karakteristiku oblika slova S, NR izobliči napon rešetke tako, da vršna vrijednost ovog napona postane veća, nego bez NR. Posljedica toga je smanjenje izlazne snage.

vrijednost anodne struje, a s druge strane pojava struje rešetke. Primjenom NR napon na rešetki se izobliči, i to tako da njegova vršna vrijednost postane veća. Ova vršna vrijednost ne smije biti viša od maksimalne amplitude, koja je dopuštena u slučaju bez NR. Iz toga slijedi da osnovni val u naponu rešetke mora imati manju amplitudu. Kako je izlazna snaga proporcionalna osnovnom valu, to će se ona primjenom NR smanjiti. Odnose napona na rešetki u vezi sa NR prikazuje sl. 62.

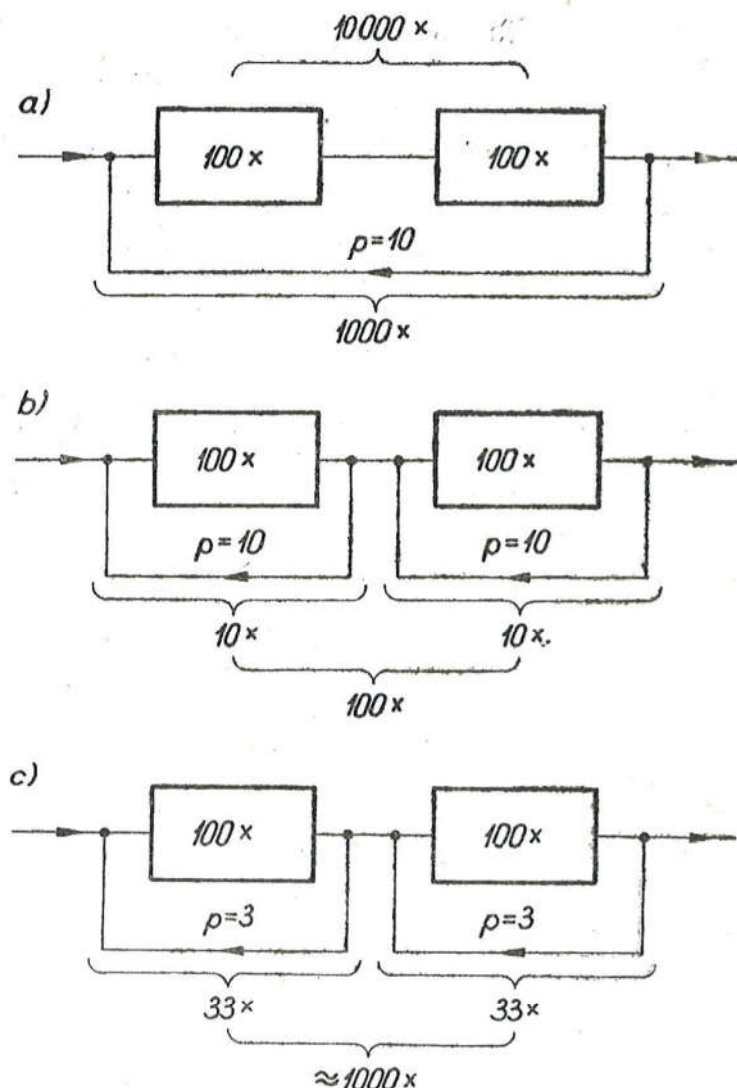
Primjenom NR dolazi i do drugih gubitaka izlazne snage. Tu snagu troše elementi, pomoću kojih se dobiva reakcioni napon. Nepremošteni katodni otpornik kod strujne NR, ili otporna grana paralelna elektronki kod naponske NR, troše jedan dio izlazne snage. Kako je ta snaga malena, o njoj najčešće nije potrebno voditi računa.

Kao što je napomenuto u poglavlju o harmoničkom izobličenju, pojačalo u NR kod maksimalne snage uzrokuje mnogo neugodnija izobličenja nego bez NR. Da se ne bi došlo u to opasno područje, treba kod pojačala za akustičke svrhe kod kojeg je primijenjena jača NR, radi sigurnosti raditi s ma-

njom izlaznom snagom. To je razlog, zbog kojega možemo smatrati, da NR prividno smanjuje izlaznu snagu pojačala.

12. Prednost uključivanja više stupnjeva pojačala u petlju negativne reakcije

U trećoj glavi opisat ćemo, kakve sve poteškoće nastupaju, kad se jača NR primijeni preko više stupnjeva pojačala. Ne bi li prema tome bilo logično, da u petlju NR ne uključujemo više stupnjeva? Primijenimo, dakle, NR kod



Sl. 63. a) Pojačalo s oba stupnja u zajedničkoj petlji NR ima veliko pojačanje uz jaku NR. b) Uz istu NR kod svakog stupnja posebno pojačanje pojačala je maleno. c) Ako uz NR primijenjuju kod svakog stupnja posebno treba dobiti veliko pojačanje, ne može se primijeniti jaka NR.

svakog stupnja posebno, pa se ne treba bojati onih pojava, koje su karakteristične za NR primijenjenu preko više stupnjeva?! Ovakav način bi nas, istina, osigurao od spomenutih negativnih pojava, ali bi istodobno unio takve nedostatke, da ne dolazi u obzir za primjenu. Odmah će nam biti jasno, zašto.

Neka se radi o pojačalu s dva stupnja, u kojem svaki stupanj pojačava 100 puta, tako da je ukupno pojačanje pojačala 10.000 (sl. 63.a). Primjenom deseterostruke NR ($p = 10$ ili 20 decibela) preko oba stupnja dobiva se pojačanje 1.000 (60 decibela). Sve prednosti NR u vezi su s ovim faktorom 10, to jest izobličenje se smanjuje deset puta, promjene u pojačanju su deset puta manje, i t. d. Ako bismo ovoliku NR primijenili kod svakog stupnja posebno, onda bismo imali iste prednosti, ali bi pojačanje pojačala bilo znatno manje (sl. 63.b). Svaki stupanj pojačavao bi 10 puta (20 decibela), dakle ukupno pojačanje ne bi bilo 1.000, već 100 (40 decibela). Da bismo dobili pojačanje 1.000 mogli bismo primijeniti samo trostruku NR ($p = 3$ ili približno 10 decibela)! U tom slučaju bi svaki stupanj pojačavao 33 puta (približno 30 decibela), što bi davalo ukupno pojačanje nešto preko 1.000 (sl. 63.c). Sa slabljenjem NR smanjile bi se u istom omjeru i prednosti, koje NR unosi.

Ako bi nas u gornjem slučaju moglo zadovoljiti pojačanje 100, onda bismo NR-om preko svakog stupnja posebno imali deseterostruku NR, dok bismo uvrštavanjem oba stupnja u petlju NR mogli primijeniti stostruku NR (40 decibela)!

Naročito je poučan primjer, u kojem je stupanj NR jednak pojačanju pojedinog stupnja pojačala. Kod trostepenog pojačala, kod kojeg bi svaki stupanj bez NR pojačavao 10 puta, ukupno pojačanje bilo bi 1.000. Primjenom deseterostruke NR preko sva tri stupnja pojačanje bi se smanjilo na 100. No uz isto toliku NR kod svakog stupnja pojačanje pojedinog stupnja svelo bi se na jedinicu, pa bi ukupno pojačanje bilo također jednako jedinici!

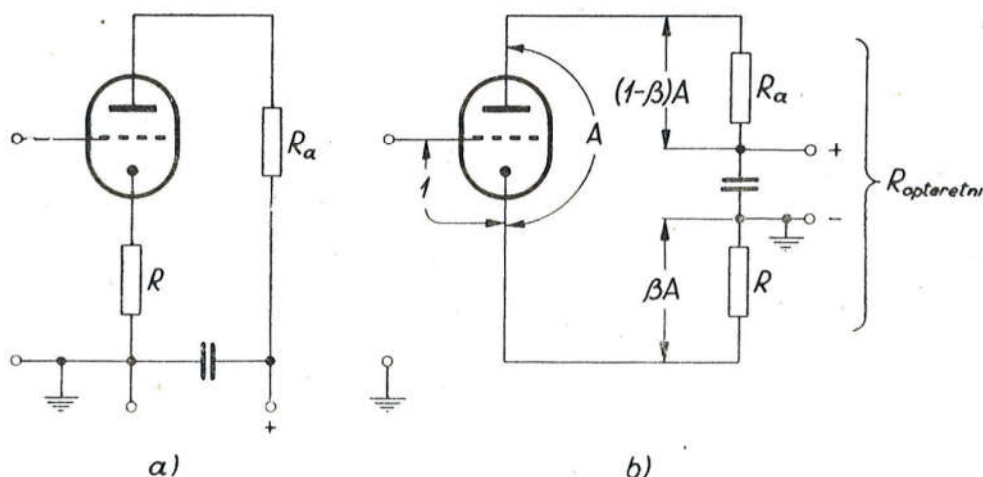
Kad god se, dakle, radi o jakoj NR, onda se ona ne primjenjuje u pojedinom stupnju pojačala, jer u tom slučaju dotični stupanj ima suviše maleno pojačanje.

GLAVA TREĆA

NEKI POSEBNI SLUČAJEVI NEGATIVNE REAKCIJE

1. Strujna negativna reakcija kod jedne elektronke

1. Katodni otpor je dio opterećnog otpora. — Katodni otpor, na kojem se dobiva reakcioni napon kod elektronke u strujnoj NR, u ovom je sklopu zapravo u isti čas i dio opterećnog otpora elektronke. To se naročito dobro vidi na sl. 64.b, koja se dobiva drugačijim crtanjem sl. 64.a. Pojaćanje elek-

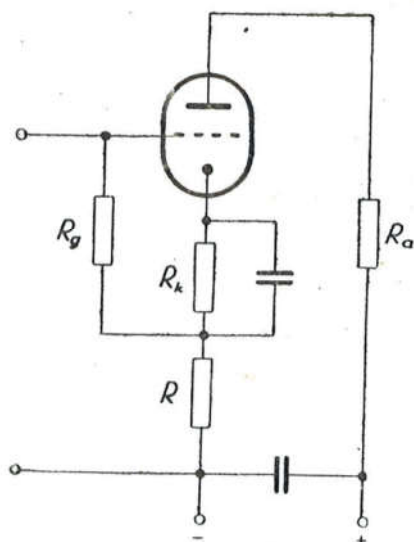


Sl. 64. Reakcioni otpor R kod elektronke u strujnoj NR dio je opterećnog otpora.

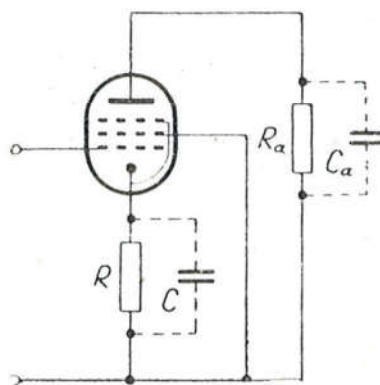
tronke jednako je vrijednosti izmjeničnog napona između anode i katode, koji se dobiva uz izmjenični napon na rešetki od 1 volta. Napon na otporu R je β -ti dio napona A , te prema tome iznosi βA volta, dok napon na anodnom otporu R_a , koji se privodi slijedećem stupnju radi daljnjeg pojaćavanja, ima vrijednost od $(1 - \beta)A$ volta. U malen faktor β napon na otporu R_a praktički je jednak naponu između anode i katode, te se za izračunavanje pojaćanja može primijeniti formula (10).

2. Napon na katodnom otporu veći od prednapona. — U slučaju, kad je potrebno, da se dobije jaća ili slabija NR, nego što je omogućuje katodni otpor, kojim se dobiva prednapon, može se upotrebiti sklop, koji vidimo na

sl. 65. Na otporu R_k dobiva se prednapon, koji se rešetki dovodi preko otpora R_g . Reakcioni napon dobiva se na otporu R . Ovaj sklop razlikuje se od sklopa na sl. 64. samo u tome, što izmjenična struja, koja iz izvora signala teče kroz otpor R_g , teče također i kroz reakcioni otpor R . Obje struje — anodna i ova iz izvora signala — istofazne su, tako da na otporu R nastaje veći pad napona, nego što bi slijedilo iz radne strmine elektronke. U praktičnim sklopovima ne treba o dodatnoj struji (koja teče kroz otpor R_g), voditi računa, jer je otpor R_g vrlo velik, te je struja zanemarivo malena.



Sl. 65. Sklop sa NR, koji se primjenjuje u slučaju, kad je reakcioni otpor veći ili manji od prednaponskog.



Sl. 66. Konstantno pojačanje uz parazitni kapacitet C_a dobiva se tako, da se reakcionom otporu R doda odgovarajući kapacitet C .

3. Konstantna negativna reakcija uz kompleksan anodni otpor. — Uz gore napomenutu pretpostavku (da je napon na otporu R_a praktički jednak naponu na elektronki), i uz uvjet, da je otpor R mnogo manji od otpora R_a , što je normalno slučaj, imamo da je $\beta = R/R_a$. Prema formuli (17) pojačanje sklopa uz jaku NR (veliko A — pentoda!) postaje jednako recipročnoj vrijednosti faktora β , odnosno u našem slučaju:

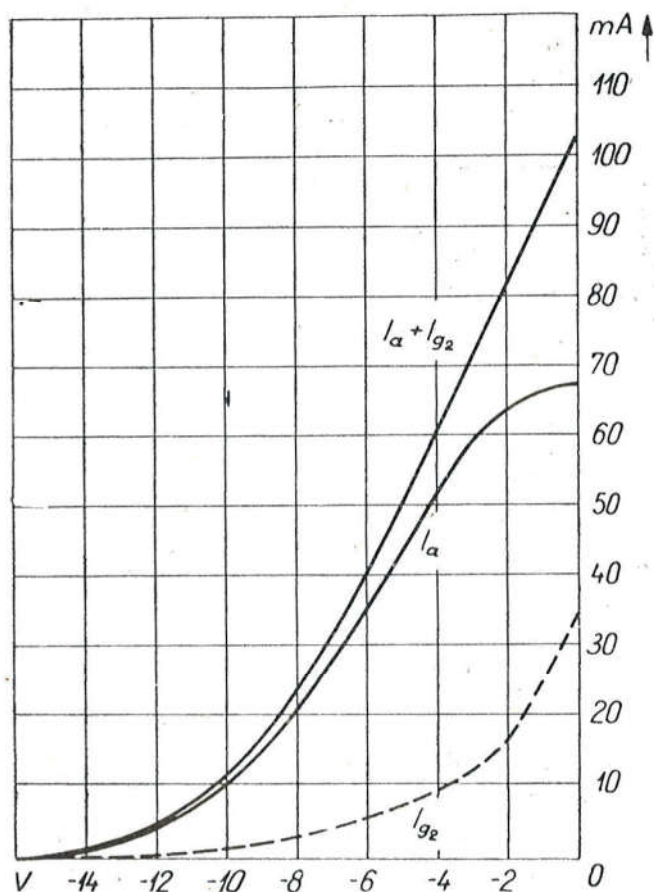
$$A' \approx \frac{R_a}{R} \quad (44)$$

Kad se paralelno otporu R_a nalazi spojen parazitni kapacitet C_a (sl. 66.), onda pojačanje A može ostati konstantno samo u slučaju, ako odnos anodne impedancije prema katodnoj impedanciji ostaje konstantan. To znači da paralelno otporu R treba dodati takav kapacitet C , da vremenska konstanta RC bude jednaka vremenskoj konstanti $R_a C_a$, odnosno treba da vrijedi odnos:

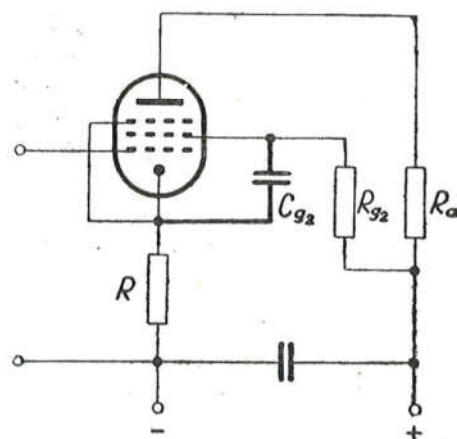
$$\frac{C}{C_a} = \frac{R_a}{R} \quad (45)$$

4. Kroz reakcioni otpor ne smije prolaziti izmjenična struja zaštitne rešetke. — Kako je kod pentode u normalnom sklopu kondenzator zaštitne

rešetke spojen sa »zemljom«, to kroz reakcioni otpor teče ne samo izmjenična komponenta anodne struje, nego i izmjenična komponenta struje zaštitne rešetke. Iz dijagrama na sl. 67. se vidi, da je struja zaštitne rešetke samo uz donji dio radne karakteristike elektronke proporcionalna anodnoj struji. Budući da reakcioni napon treba da bude proporcionalan izmjeničnoj anodnoj



Sl. 67. Kod manjih prednapona struja zaštitne rešetke nije proporcionalna anodnoj struji. Iz toga slijedi, da izmjenična komponenta katodne struje (koja je jednaka zbroju izmjeničnih komponenta anodne struje i struje zaštitne rešetke) nije slična izmjeničnoj komponenti anodne struje.

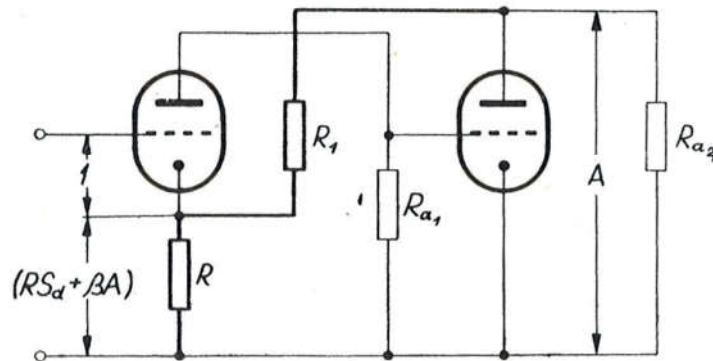


Sl. 68. Da bi reakcioni napon na otporu R bio po svom obliku sličan izmjeničnoj komponenti anodne struje, treba spajanjem kapaciteta C_{g2} na katodu onemogućiti, da izmjenična komponenta struje zaštitne rešetke protiče kroz otpor R .

struji, mora se spriječiti, da također izmjenična struja zaštitne rešetke prolazi kroz reakcioni otpor. Zato se kondenzator ne spaja sa »zemljom«, već s katodom, kao na sl. 68. Ovakvim načinom spajanja dodaje se otpor zaštitne rešetke paralelno katodnom otporu, te veličina reakcionog napona ovisi o otpornoj vrijednosti paralelnog spoja ovih dvaju otpora.

2. Naponska negativna reakcija preko dva stupnja pojačala

1. Pojačanje uzimajući u obzir obje negativne reakcije. — Najčešći sklop s naponskom NR preko dva stupnja pojačala vidimo na sl. 69. Budući da kod dvostepenog pojačala na rešetki prvog stupnja i na anodi drugog stupnja djeluje polual istog predznaka, to nije moguće napon s anode dovesti direktno na rešetku, jer bi se umjesto negativne dobila pozitivna reakcija. Naprotiv, ako se napon s anode druge elektronke dovede katodi prve elektronke, onda preko katodnog i rešetkinog otpora rešetka dobiva polual suprotnog predznaka, te je sklop u negativnoj reakciji.



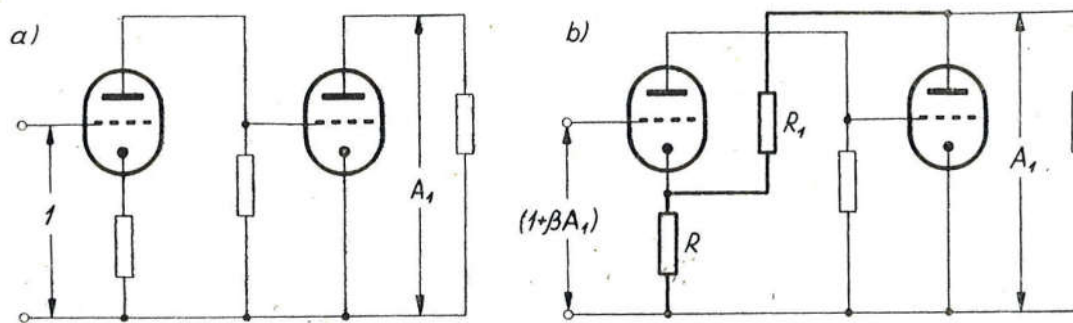
Sl. 69. Dvostepeno pojačalo sa NR »od anode na katodu«. Shema je crtana samo za izmjenične komponente.

Na otporu R dobiva se reakcioni napon od obiju elektronki. Prva elektronka je sama za sebe u strujnoj NR. Uz napon od 1 volta između rešetke i katode teče kroz otpor R anodna struja prve elektronke, koja ima vrijednost od S_d ampera. Strogo uzevši, otporu R spojen je paralelno sklop sastavljen od otpora R_{k1} , R_{a2} i unutarnjeg otpora druge elektronke. Kako ovaj sklop u normalnom slučaju ima otpornu vrijednost mnogo veću od R , to ga ne treba uzimati u obzir. Kroz otpor R šalje struju također druga elektronka. Ako izmjenični anodni napon druge elektronke označimo sa A (A je pojačanje od rešetke prve elektronke do anode druge elektronke, dakle pojačanje pojačala bez NR), onda će na otporu R vladati napon, koji ima vrijednost βA volta. Druga elektronka će prema tome slati kroz otpor R struju od $\beta A/R$ ampera. Obje struje su istofazne, te njihov zbroj daje $(S_d + \beta A/R)$ ampera. Ukupna ova struja pomnožena s otporom R daje reakcioni napon od $(RS_d + \beta A)$ volta. Iz ovoga slijedi pojačanje sklopa u NR:

$$A' = \frac{A}{1 + RS_d + \beta A} \quad (46)$$

Faktor β je, kao što otprije znamo, odnos otpora $R/(R + R_{k1})$.

2. Pojačanje izraženo samo faktorom naponske negativne reakcije. — Pitanje pojačanja može se promatrati i tako, da se ne uzima u obzir posebno strujna NR prvog stupnja, već se pojačanjem pojačala bez NR smatra pojačanje bez naponske NR, na sl. 70.a označeno sa A_1 . Ovo je pojačanje $(1 + RS_d)$ puta manje od pojačanja A . Uz primjenu naponske NR, koja je ovdje dobi-



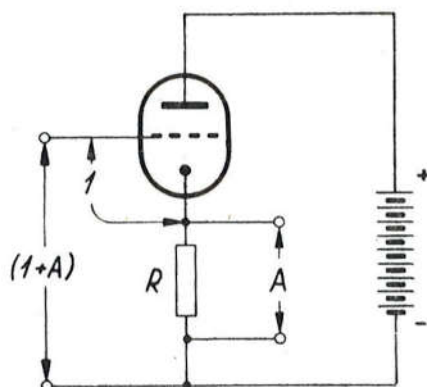
Sl. 70. Dvostepeno pojačalo: a) bez NR, b) sa NR »od anode na katodu«.

vena spajanjem anode druge elektronke s katodom prve pomoću otpora R_1 , pojačanje se smanji na:

$$A' = \frac{A_1}{1 + \beta A_1} \quad (47)$$

3. Katodin

1. Pojačanje katodina uvijek je manje od 1. — Stavljanjem opterećnog otpora između katode i »zemlje« umjesto između anode i »zemlje« dobiva se pojačalo posebnih svojstava, koje se zove katodin (sl. 71.).



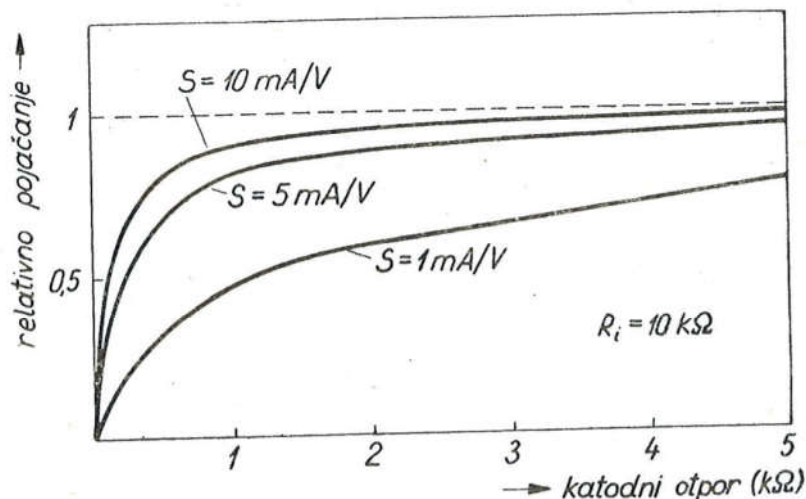
Sl. 71. Kod katodina je ulazni napon veći od izlaznog napona.

Prvo, što će nas zanimati, bit će, kako stoji s pojačanjem ovakvog pojačala. Kao što se vidi iz sheme, radi se o pojačalu u *naponskoj* NR (reakcioni napon proporcionalan, ovdje jednak naponu na opterećnom otporu), kod kojeg je cijeli izlazni napon istodobno i reakcioni napon. Ako, dakle, između rešetke i katode djeluje izmjenični napon od 1 volta, tada ćemo na katodnom, odnosno opterećnom otporu, imati A volta. Ulazni napon iznositi će prema tome $(1 + A)$ volta. Iz ovoga slijedi pojačanje katodina:

$$A' = \frac{A}{1 + A} \quad (48)$$

Ovo je formula (10) uz $\beta = 1$. Iz dijagrama na sl. 72. vidi se, kako pojačanje katodina ovisi o opterećenom otporu kod elektronke s različitim strminama.

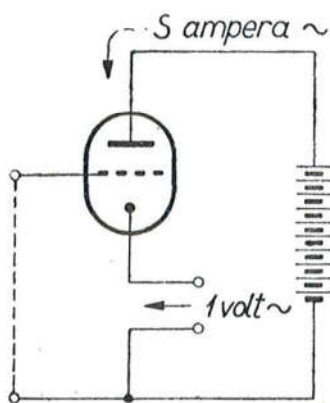
Katodin, dakle, zapravo nije pojačalo, nego »slabilo«, jer mu je pojačanje uvijek manje od 1. To je njegov veliki nedostatak. No ipak on ima stanovite prednosti, zbog kojih je u nekim slučajevima nezamjenjiv.



Sl. 72. Ovaj dijagram prikazuje ovisnost pojačanja katodina o opterećenom (katodnom) otporu kod elektronke, koje imaju strmine 1, 5 i 10 mA/V, i jednaki unutarnji otpor od 10 kilooma.

2. Izlazni otpor katodina je vrlo malen. — Najvažnija karakteristika katodina je njegov *malen izlazni otpor*, odnosno *malena izlazna impedancija*. Ovu veličinu naći ćemo na način sličan onome, kako smo to prije činili. Na izlazne priključnice katodina privest ćemo izmjenični napon od 1 volta (sl. 73.). Ovaj napon djeluje u isti čas i na rešetki. Iz definicije strmine elektronke znamo, da je strmina ona promjena struje, koju izazove promjena napona na rešetki od 1 volta. Prema tome u našem slučaju iznositi će izmjenična komponenta struje S ampera. Kako napon podijeljen sa strujom daje otpor, to će izlazni otpor katodina biti:

$$R_o' = \frac{1}{S} \quad (49)$$



Sl. 73. Izlazni otpor katodina jednak je kvocijentu napona od 1 volta, privedenog izlazu i struje od S ampera, koju ovaj napon izazove.

No ovdje smo nešto previdjeli, ili bolje reći, hotimično zanemarili. Izmjenični napon od 1 volta na izlaznim priključcima djeluje ne samo na rešetki, nego i na anodi. Da bi nam rezultat bio posve točan, moramo uzeti u obzir i ovaj izmjenični napon na anodi. Napon od 1 volta na rešetki možemo prikazati kao napon od μ volta na anodi. Budući da se radi o naponima iste faze, to ćemo sada kao ukupni anodni napon imati $(1 + \mu)$ volta. U anodnom krugu primijenili smo napon od 1 volta, a ovaj napon djeluje kao

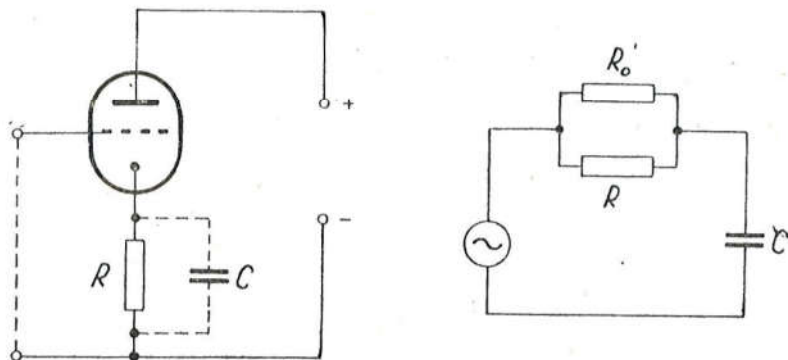
napon od $(1 + \mu)$ volta! Prema tome će anodna struja biti $(1 + \mu)$ puta veća, nego što odgovara privedenom vanjskom naponu. Umjesto povećanja napona u anodnom krugu na $(1 + \mu)$ puta veću vrijednost, možemo uzeti, da se je toliko puta smanjio izlazni otpor, te imamo:

$$R_o' = \frac{R_i}{1 + \mu} \quad (50)$$

Vidimo, da je to zapravo formula (26), u kojoj je stavljeno da je $\beta = 1$, kao što ovdje i jest slučaj, jer se radi o stopostotnoj NR. Totalni izlazni otpor katodina čini paralelni spoj otpora R_o' i R .

Kao što vidimo, katodin ima vrlo malen izlazni otpor. Ovo svojstvo katodina dobro dolazi, na primjer, u slučaju, kad u rešetki narednog stupnja treba napon privedi preko malenog otpora (kad u rešetkinom krugu teče struja rešetke). Da bi izlazni otpor bio što manji, treba za katodin uzeti triodu, ili pentodu spoјenu kao triodu, sa što većom strminom (vidi formulu 49.).

Malen izlazni otpor daje katodinu vrlo dobru prigušnu karakteristiku kod visokih frekvencija. Do gubitka napona od 30% dolazi tek onda, kad se kapacitivni otpor štetnih kapaciteta, koji su opteretnom otporu spoјeni paralelno (sl. 74.), izjednači s otporom paralelnog spoја izlaznog otpora i opte-

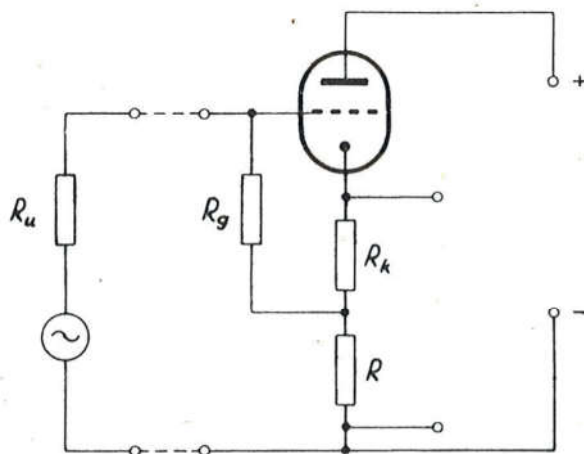


Sl. 74. Gornju graničnu frekvenciju katodina određuje parazitni kapacitet C i totalni izlazni otpor.

retnog otpora. U normalnom slučaju ovako određena gornja granična frekvencija iznosi nekoliko megaherca. Katodin može imati vrlo dobru prigušnu karakteristiku i kod niskih frekvencija, ako se istosmjerna struja mirovanja pusti da teče kroz opteretni otpor, umjesto da se ovaj odijeli od katodnog otpora pomoću kondenzatora (gubitak napona na kondenzatoru!).

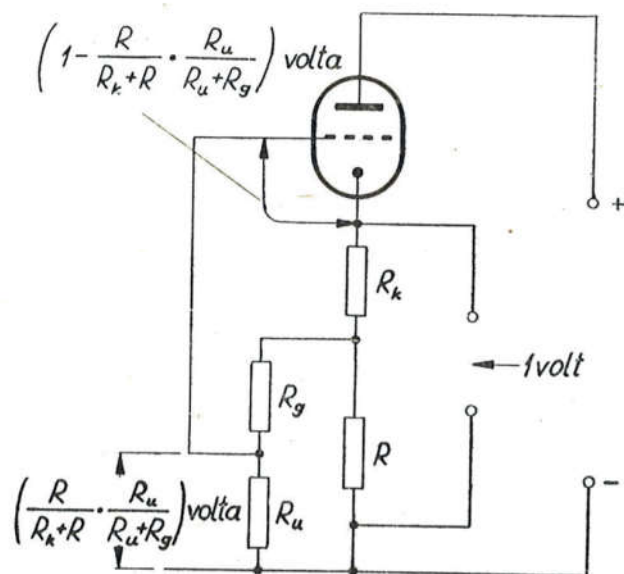
3. Sklop, u kojem izlazni otpor katodina ovisi o unutarnjem otporu izvora ulaznog napona. — Katodin se vrlo često upotrebljava u sklopu, koji vidimo na sl. 75. Ovdje izlazni otpor nije konstantna veličina, već ovisi o tome, koliki unutarnji otpor ima izvor signala. Privedemo li izlaznim priključcima neki napon, kao što smo to pri traženju izlaznog otpora prije činili, ne će cijeli ovaj napon prispjeti na rešetku. Iz sheme na sl. 76. vidi se, da će se ovaj

napon podijeliti na otporima R_k , R , R_a i R_u , i tek jedan dio napona doći će na rešetku. Ako privedeni napon iznosi 1 volt, onda će kroz otpore R_k i R teći struja od $1/(R_k + R)$ ampera (otpor R_g je mnogo veći od otpora R , te je struja u ovoj grani zanemarivo malena), odnosno, na otporu R vlada napon



Sl. 75. Sklop, u kojemu na izlazni otpor katodina djeluje unutarnji otpor izvora signala.

od $R/(R_k + R)$ volta. Ovaj napon dijeli se dalje u odnosu otpora R_g i R_u , tako da na otporu R_u preostaje napon od $(R/(R_k + R)) \cdot (R_u/(R_g + R_u))$ volta. Na rešetki, to jest između rešetke i katode, vlada razlika između ukupnog napona



Sl. 76. U sklopu prema sl. 75. ne djeluje na rešetki cijeli privedeni napon od 1 volta, već dio ovog napona, koji vlada na otporima R_k i R_g .

(napona od 1 volta) i napona na otporu R_u , vlada, dakle napon od $1 - \frac{R}{R_k + R} \cdot \frac{R_u}{R_g + R_u}$ volta. Ovaj napon na rešetki ima na anodnu struju isti učinak, kao μ puta veći napon na anodi, tako da umjesto formule (50) imamo ovu formulu:

$$R_o' = \frac{R_i}{1 + \mu \left(1 - \frac{R}{R_k + R} \cdot \frac{R_u}{R_g + R_u} \right)} \quad (50a)$$

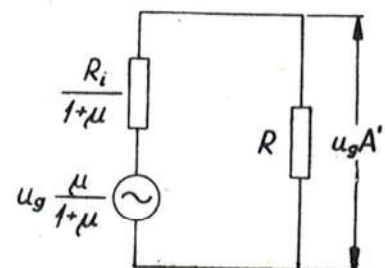
Da bi se dobio totalni izlazni otpor, treba otporu R_o' dodati paralelno otpor $(R_k + R)$.

Ako je unutarnji otpor izvora signala R_u vrlo malen, mnogo manji od otpora R_g , onda praktički cijeli privedeni napon od 1 volta dolazi na rešetku, te za izračunavanje izlaznog otpora vrijedi formula (50). Naprotiv, ako je otpor R_u vrlo velik prema otporu R_g (na primjer, ulaz otvoren), dolazi na rešetku samo napon s otpora R_k , te je izlazni otpor veći od onoga, koji se dobiva formulom (50).

4. Ulazna impedancija katodina je vrlo velika. — Ulazna impedancija je kod katodina, kao kod elektronke u (serijskoj) NR općenito, velika, samo ovdje utoliko veća, što se radi o NR o faktorom β , koji je jednak jedinici. Zbog toga kapacitet rešetka-katoda ima malen utjecaj, te je ulazna impedancija uglavnom određena kapacitetom rešetka-anoda (anoda je s obzirom na izmjeničnu struju kod katodina spojena sa »zemljom«). Zbog svoje velike ulazne impedancije katodin ima vrlo malen utjecaj na prigušnu karakteristiku prethodnog stupnja.

Velika ulazna impedancija i malena izlazna impedancija daju katodinu svojstva gotovo idealnog transformatora impedancije. Ova se transformacija dobiva uz neznatan gubitak napona, vrlo maleno harmoničko izobličenje i vrlo dobru prigušnu karakteristiku, što drugim sredstvima jedva da se može postići.

5. Nadomjesna shema katodina. — Da bismo mogli nacrtati nadomjesnu shemu katodina, treba još naći njegovu elektromotornu silu. To znači da treba naći napon, koji katodin daje kao generator, kad je opteretni otpor neizmjenno velik, odnosno, kad opteretnog otpora unopće nema. Poći ćemo odostrag prema naprijed, te ćemo pretpostaviti, da uz stanoviti ulazni napon izlazni napon iznosi μ volta. Znamo, da je to slučaj, kada između rešetke i katode vlada napon od 1 volta, te će prema tome ulazni napon iznositi $(1 + \mu)$ volta. Kad bismo ulazno priveli napon od 1 volta, onda bismo na izlazu dobili $(1 + \mu)$ puta manji napon, to jest $\mu/(1 + \mu)$ volta. To je elektromotorna sila katodina uz ulazni napon od 1 volta. Uz ulazni napon od u_g volta bit će elektromotorna sila $u_g \cdot \mu/(1 + \mu)$ volta. Tako smo dobili sve veličine potrebne za nadomjesnu shemu, koju vidimo na sl. 77.



Sl. 77. Nadomjesna shema katodina.

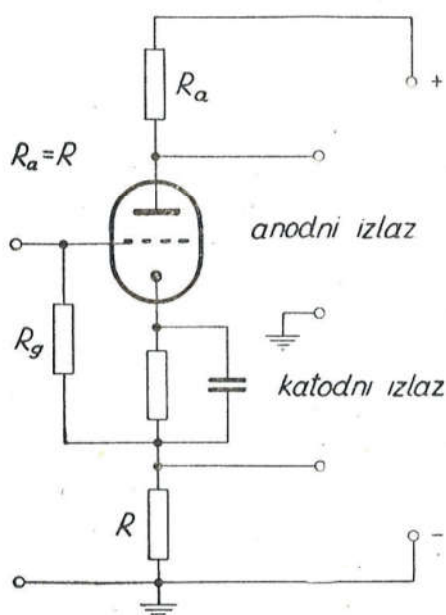
6. Izlazna snaga. — Što se tiče izlazne snage katodina, vrijedi u principu isto, što je rečeno već prije o izlaznoj snazi elektronke u NR. Također katodin treba opteretiti istim opterećenim otporom, koji kao takav vrijedi za dotičnu elektronku u normalnom sklopu.

7. Glavne karakteristike katodina. — Nabrojiti ćemo ukratko svojstva katodina:

1. Ulazna impedancija je velika, a izlazna malena, što omogućuje, da se katodin upotrebi kao odjelni stupanj između generatora s velikim unutarnjim otporom i opterećenja s velikom kapacitivnom komponentom.
2. Zbog stopostotne naponske NR izlazni napon je praktički neovisan o opterećenju.
3. Jedna strana izlaza je uzemljena, što je često velika prednost.
4. Izlazni napon je u fazi s ulaznim naponom.
5. Prigušno, harmoničko i fazno izobličenje je vrlo maleno.

4. Katodinski obrtač faze

Za pogon protufaznih stupnjeva potrebno je signalnim rešetkama dovesti napone jednakih amplituda, ali suprotnih faza. Nekada su se za dobivanje ovakvih napona upotrebljavali transformatori. No oni su danas gotovo potpuno potisnuti elektronskim obrtačima faze, koji pred transformatorima imaju između ostaloga i tu prednost, što su manji, lakši, jeftiniji i neosjetljivi na rasipna magnetska polja. Iznimku čine slučajevi, gdje je za pogon protufaznih stupnjeva potrebna snaga, ili kod vrlo velikih jedinica, gdje je primjena R-C-veze neekonomična.



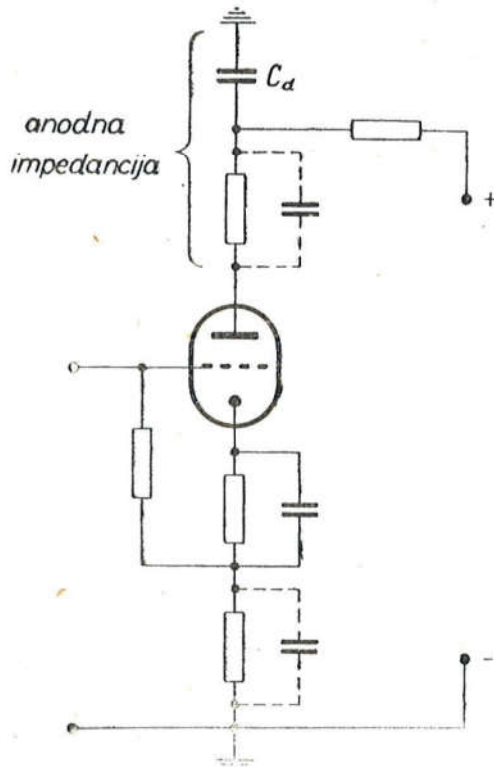
Sl. 78. Katodinski obrtač faze.

1. Jedan, izlaz s naponskom, a drugi sa strujnom negativnom reakcijom. — Kod katodinskog obrtača faze, koji je za nas zanimljiv u vezi sa NR, elektronka se nalazi između dva jednaka otpora, kao što je to prikazano na sl. 78. Jedan od napona za pogon protufaznih elektronki uzima se s katode, a drugi s anode. Izlaz s katode podvgnut je naponskoj NR, a onaj s anode strujnoj NR. U području srednjih frekvencija jednakost izlaznih napona ovisi praktički samo o jednakosti katodnog i anodnog otpora. Nesimetriju može uzrokovati jedino izmjenična struja, koja teče kroz odvodni otpor R_g zbog čega napon na otporu R postaje veći. No praktičko značenje ima ova struja tek onda, kad otpor R_g ima relativno nisku vrijednost, ispod 100 kilooma.

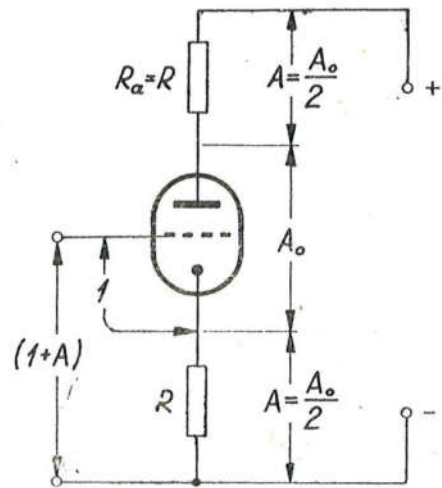
Za katodinski obrtač faze upotrebljava se redovito trioda. Ako bi se upotrebila pen-

toda, kod koje bi filtarski kondenzator zaštitne rešetke bio spojen na »zemlju«, onda napon zaštitne rešetke prema katodi ne bi bio konstantan, već bi se u ritmu signala mijenjao onako, kako se mijenja napon katode prema »zemlji«. To znači, da bi pentoda stvarno radila kao trioda. Stoga bi trebalo filtarski kondenzator spojiti na katodu. No to bi uzrokovalo nesimetriju kod ekstremnih frekvencija, te ne dolazi u obzir.

2. Izlazi nisu posve simetrični. — Kod niskih frekvencija nesimetriju uzrokuje filtarski kapacitet C_d , jer anodna impedancija postaje veća, te i pojačanje postaje kod niskih frekvencija veće (sl. 79.). No od većeg značenja



Sl. 79. Kod katodinskog obrtača faze nesimetriju uzrokuje filtarski kapacitet C_d i paraziti kapaciteti, koji su spojeni paralelno opteretnim otporima.



Sl. 80. Pojačanje do pojedinog izlaza katodinskog obrtača faze jednako je polovini punog pojačanja elektronke.

je fazna nesimetrija, do koje dolazi zbog kapaciteta C_d . Zato ovaj kapacitet treba da bude što veći (normalno najmanje 8 mikrofara).

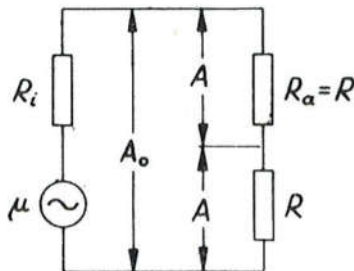
Do nesimetrije kod visokih frekvencija može doći jedino zbog razlike u vrijednostima parazitnih kapaciteta, koji su spojeni paralelno katodnom i anodnom otporu. Ovi kapaciteti su obično ulazni kapaciteti protufaznih elektronki, te su približno jednaki. Zato ih u normalnom slučaju nije potrebno posebno izjednačivati.

Pojačanje katodinskog obrtača faze je manje od 1 po fazi, kao što to slijedi iz razmatranja pojačanja katodina. Označimo li puno pojačanje sklopa, to jest pojačanje od rešetke do anode, kao što je naznačeno na sl. 80., sa A_o ,

onda će pojačanje A od rešetke do pojedinog izlaza biti jednako polovini punog pojačanja. Iz ovoga slijedi, da će pojačanje s obzirom na ulazni napon biti:

$$A' = \frac{A}{1 + A} \quad (50)$$

Napon A možemo izraziti kao produkt struje i otpora.



Sl. 81. Kod katodinskog obrtača faze se uz napon 1 između rešetke i katode dobiva elektromotorna sila μ , a na pojedinom izlazu napon A .

Iz sheme na sl. 81. izlazi, da je:

$$A = \frac{\mu}{R_i + 2R} \cdot R \quad (51)$$

Ovaj izraz uvršten u formulu (48) daje drugu formulu za pojačanje po fazi kod katodinskog obrtača faze:

$$A' = \frac{\mu R}{R(\mu + 2) + R_i} \quad (52)$$

U praktičkim izvedbama ovo pojačanje iznosi oko 0,9.

Izlazni otpor na katodi je nizak, a anodi visok. Na način sličan onome, koji smo primijenili pri traženju izlaznog otpora katodina, možemo naći izlazni otpor katodinskog obrtača faze na katodi. Dovedimo izmjenični napon od 1 volta između katode i »zemlje«. Ovaj će napon djelovati tako, kao da u anodnom krugu vlada elektromotorna sila od $(\mu + 1)$ volta. Prema tome će u anodnom krugu teći struja od $(\mu + 1) / (R_i + R_a)$ ampera. Napon od 1 volta podijeljen s ovom strujom daje izlazni otpor u slučaju, kad nema katodnog otpora:

$$R'_{ok} = \frac{R_i + R_a}{\mu + 1} \quad (53)$$

Izlazni otpor na katodi jednak je paralelnom spoju otpora R'_{ok} i R .

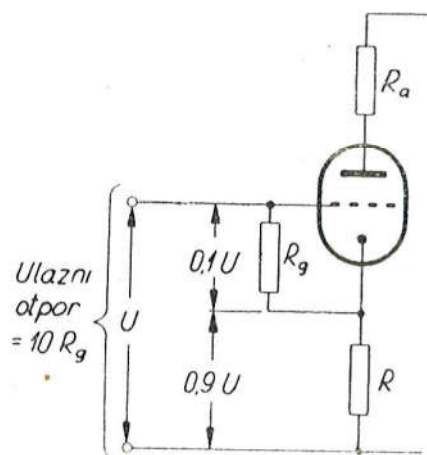
Za traženje izlaznog otpora na anodi možemo se poslužiti formulom (31), koja daje otpor gledan s otpora R_a :

$$R'_{oa} = R_i + (\mu + 1) R \quad (31a)$$

Izlazni otpor na anodi jednak je paralelnom spoju otpora R'_{oa} i R_a .

Iz ovog razmatranja slijedi, da na pojačanje manje utječe promjena opterećenja na katodi, nego na anodi. No zbog različitih izlaznih otpora ipak se ne gubi simetrija izlaznih napona. *Jednakost ovih napona ovisi samo o jednakosti katodne i anodne impedancije, jer su one spojene u seriju, te kroz njih protječe ista izmjenična struja.* Ako se želi sačuvati što veća simetrija i uz različite kapacitete, treba ići na što manje opteretne otpore.

3. Ulazna impedancija je pretežno kapacitivna. — Ulazna impedancija katodinskog obrtača faze je velika. Uz pojačanje od 0,9 po fazi, koliko ono obično iznosi, jedna desetina ulaznog napona leži na otporu R_g (sl. 82.), što



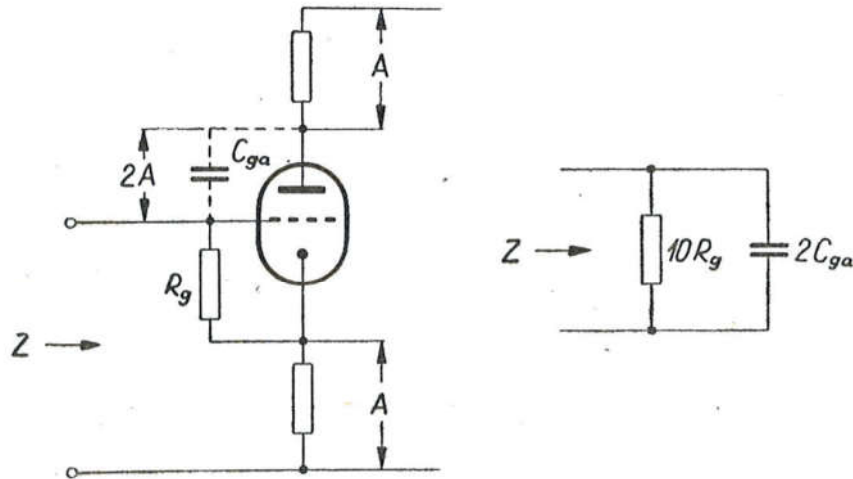
Sl. 82. Ulazni otpor katodinskog obrtača faze je u normalnim praktičkim sklopovima deset puta veći od rešetkinog otpora.

znači, da je struja, koja teče kroz ovaj otpor, deset puta manja, nego što odgovara ulaznom naponu, ili — što je isto — da je ulazni otpor deset puta veći od R_g (otpor R je prema otporu R_g zanemarivo malen!).

Isti zaključak, do kojeg smo došli u vezi s otporom R_g , vrijedi i za kapacitivni otpor kapaciteta rešetka-katoda. Zato utjecaj ovog kapaciteta ne moramo uzimati u obzir u poređenju s utjecajem kapaciteta rešetka-anoda. Ovaj posljednji kapacitet nalazi se, kao što ćemo kasnije vidjeti (Millerov efekt!), pod izmjeničnim naponom, koji je jednak zbroju ulaznog izmjeničnog napona i izmjeničnog napona anode. Ova dva napona su praktički međusobno jednaka, tako da kroz kapacitet rešetka-anoda teče tolika kapacitivna struja, kao da se ovaj kapacitet nalazi pod dvostrukim ulaznim naponom, ili — što je isto — kao da ulazni napon djeluje na kapacitet, koji je jednak dvostrukom kapacitetu rešetka-anoda. Iz ovog razmatranja izlazi, da se ulazna impedancija katodinskog obrtača faze sastoji od paralelnog spoja otpora, koji ima vrijednost deset puta veću od otpora R_g , i kapaciteta, koji je dvostruko veći od kapaciteta C_{ga} (sl. 83).

4. Glavne karakteristike. — Prednosti katodinskog obrtača faze pred ostalim obrtačima su ove:

1. Velika simetrija, koja se ne mijenja s promjenom pojačanja elektronke.
2. Simetrija nije ovisna o karakteristikama elektronke, ni o istosmjernom naponu mrežnog ispravljača.
3. Vrlo maleno harmničko izobličenje.



Sl. 83. Ulazni kapacitet katodinskog obrtača faze dat je kapacitetom rešetka-anoda, koji se nalazi pod dvostrukim naponom pojedinog izlaza. Prema tome je ulazna impedancija ovog obrtača faze jednaka paralelnom spoju deseterostrukog rešetkinog otpora i dvostrukog kapaciteta rešetka-anoda.

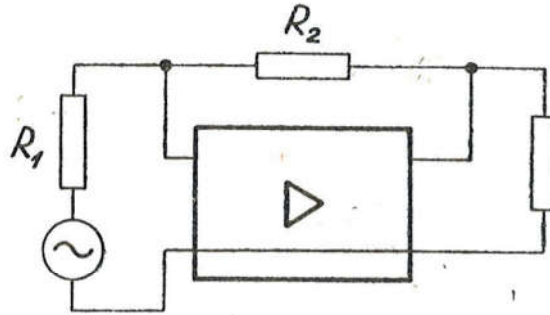
Jedina ozbiljnija nezgodna strana katodinskog obrtača faze sastoji se u tome, što se katoda nalazi prema »zemlji« na visokom potencijalu, te uz žarenje elektronke izmjeničnom strujom može doći do brujanja.

5. Paralelna negativna reakcija

U praktičkim sklopovima se izvor reakcionog napona najčešće spaja u *seriju* s izvorom ulaznog napona. Dosada smo promatrali upravo takve sklopove. No postoji mogućnost da se ova dva izvora napona spoje *paralelno*, kao što je prikazano na sl. 84. Tako dobivamo paralelnu NR.

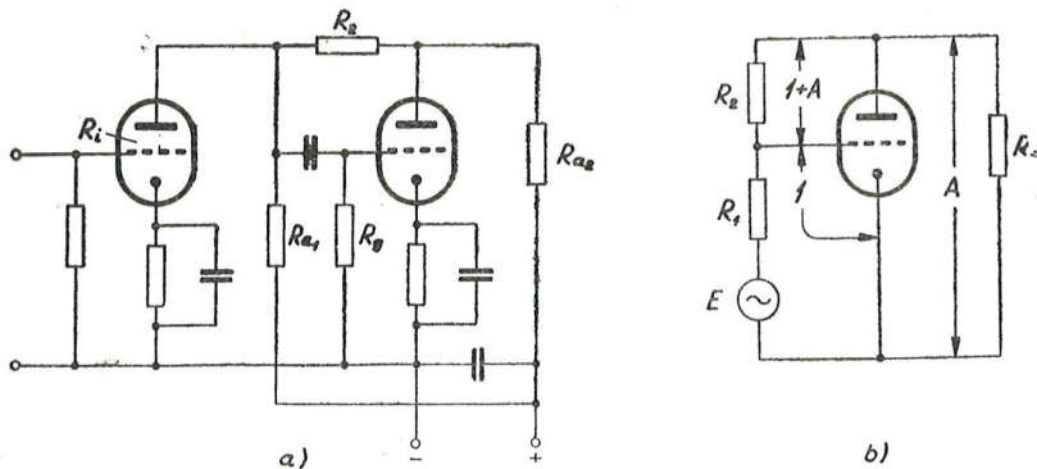
1. Pojaćanje kod paralelne negativne reakcije. — Paralelna NR u praksi se rijetko primjenjuje, a ukoliko do njezine primjene dolazi, pojavljuje se obično u sklopu, čiju shemu vidimo na sl. 85a. Ova se shema može svesti na shemu na sl. 85b, gdje je otpor R_1 jednak paralelnom spoju otpora R_{a1} , R_{a2} i R_g iz sl. 85a. Razmotrit ćemo najprije, koliko pojaćanje ima ovakav sklop. Kad je elektronka iskopčana, teče kroz otpore R_1 , R_2 i R_{a2} struja, koju tjera elektromotorna sila E . Na otporu R_1 dolazi do pada napona, zbog čega na rešetki elektronke ne vlada puni napon E . Budući da je u praktičkom sklopu struja, koja teče u ovom krugu, vrlo malena, a otpor R_1 mnogo manji od otpora R_2 (R_a je mnogo manji od oba otpora, te se može zanemariti), to bez daljnijega možemo uzeti, da je napon na rešetki u ovom slučaju jednak elektromotornoj sili E .

Neka u početku elektromotorna sila E ima vrijednost od 1 volta. Kad elektronka ne radi (na primjer, isključeno je njezino žarenje), onda i na rešetki, prema gore rečenome, vlada napon od 1 volta. Prilike će se promijeniti, ako se elektronka uključi. Neka i u ovom slučaju izmjenični napon *na rešetki* ima vrijednost od 1 volta. Tada će između anode i katode vladati napon od A volta. Napon na rešetki je, kao što je poznato, u protufazi prema



Sl. 84. Pojačalo u paralelnoj NR.

naponu anode. No to vrijedi onda, kad je katoda točka, s koje se gleda. Pogledamo li pažljivije, vidjet ćemo, da ova dva napona djeluju istofazno na otpor R_2 , tako da se otpor R_2 nalazi pod naponom od $(1 + A)$ volta. Struja, koja teče kroz ovaj otpor, iznosi prema tome $(1 + A) / R_2$ ampera. Ova ista struja teče i kroz otpor R_1 , i na njemu izaziva pad napona $(1 + A) \cdot R_1 / R_2$ volta. Kad elektronka nije u NR (otpor R_2 isključen), onda kroz otpor R_1 ne teče nikakva



Sl. 85. a) Sklop sa paralelnom NR. b) Pojednostavljena shema sklopa pod a).

struja, te nema pada napona na njemu, tako da je napon rešetke u isti čas i elektromotorna sila izvora signala. Kad, dakle, na rešetki vlada napon od 1 volta, onda i elektromotorna sila E ima vrijednost od 1 volta. Primjenom NR, to jest uključivanjem otpora R_2 , dobiva se u krugu struja, koja na otporu R_1 uzrokuje gore izračunani pad napona. Da bismo i u ovom slučaju imali na rešetki napon od 1 volta, treba elektromotornu silu izvora signala povećati, i to na vrijednost, koja je jednaka zbroju napona rešetke i pada napona na otporu R_1 . Prema tome elektromotorna sila izvora signala treba sada da

iznosi: $E = 1 + (1 + A) \cdot R_1/R_2$. Ovo povećanje elektromotorne sile znak je pada pojačanja uslijed NR. Elektromotorna sila se je povećala sa 1 volta u slučaju bez NR, na $[1 + (1 + A) R_1/R_2]$ volta u slučaju sa NR, da bi se u oba slučaja dobio isti izlazni napon od A volta. Iz ovoga izlazi, da je odnos pojačanja sa NR prema pojačanju bez NR:

$$\frac{A'}{A} = \frac{1}{1 + (1 + A) \cdot \frac{R_1}{R_2}} \quad (54)$$

odnosno pojačanje uz primjenu NR:

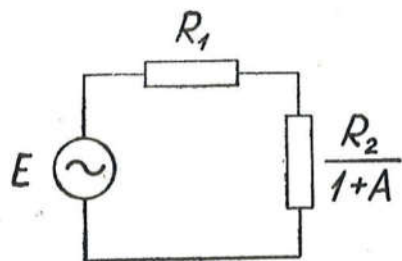
$$A' = \frac{A}{1 + (1 + A) \cdot \frac{R_1}{R_2}} \quad (55)$$

Kad bi se radilo o serijskoj NR, formula za pojačanje bi glasila:

$$A' = \frac{A}{1 + \beta A} = \frac{A}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A} \quad (56)$$

Uspoređujući formulu (55) s formulom (56) vidimo, da će ona prva dati praktički isti rezultat, kao ova druga, kad pojačanje A bude mnogo veće od 1, tako da se jedinica u zagradi može zanemariti, i kad otpor R_2 bude mnogo veći od otpora R_1 , tako da se R_2 mnogo ne razlikuje od zbroja $(R_1 + R_2)$.

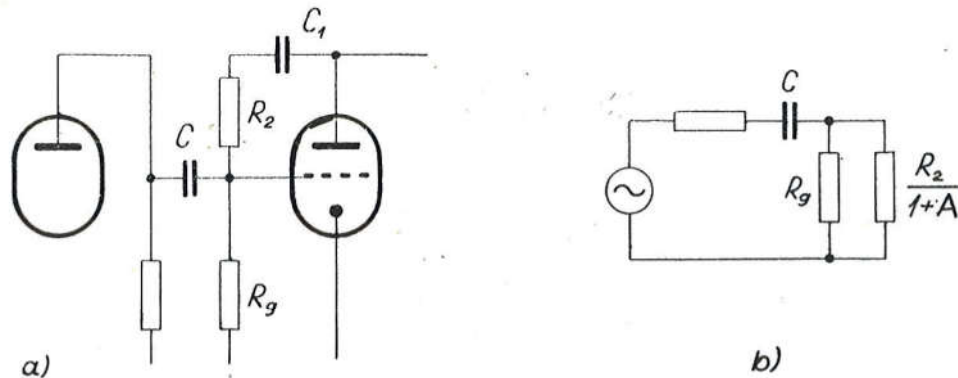
2. Ulazna impedancija se smanji. — Kao što vidimo, između serijske i paralelne NR, što se tiče pojačanja, nema (uz stanovite uvjete) bitne razlike. No zato bitna razlika postoji u vezi s ulaznom impedancijom. Da to pokažemo, poslužiti ćemo se rezultatima gornjeg razmatranja. Dok nema NR, nema pada napona na otporu R_1 . Primjenom NR dolazi do pada napona, koji uzrokuje struja od $(1 + A)/R_2$ ampera. Dakle: ova struja teče kroz otpor R_2 onda, kad na njemu vlada napon od $(1 + A)$ volta. Da bismo istu struju dobili uz napon od 1 volta, koliko vlada na rešetki (za dobivanje izlaznog napona od A volta), trebalo bi da otpor R_2 bude toliko puta manji, koliko puta je napon manji. Taj bi otpor imao prema tome vrijednost od $R_2/(1 + A)$ oma. To znači: na otporu R_1 dolazi do istog pada napona, bilo da je izvor signala opterećen elektronkom u NR preko otpora R_2 , bilo samo otporom, koji je od otpora R_2 manji $(1 + A)$ puta (sl. 86.).



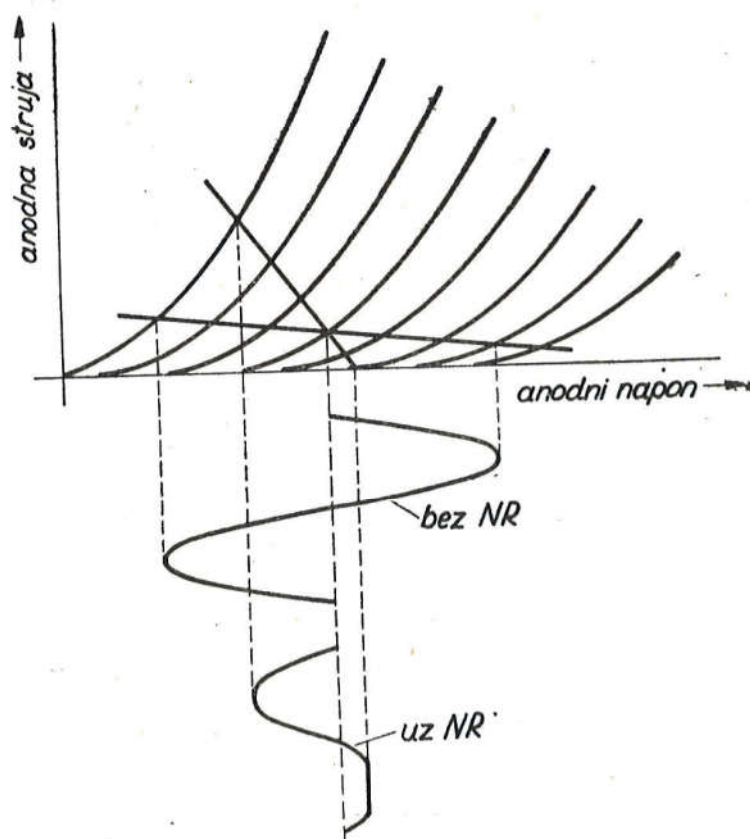
Sl. 86. U paralelnoj NR gornji se otpor reakcione grane pojavljuje na rešetki kao $(1 + A)$ puta manji.

3. Gornji otpor reakcione grane treba spojiti ispred veznog kondenzatora. — Spajanjem gornjeg otpora reakcione grane R_2 izravno na rešetku, kao što je to učinjeno u shemi na sl. 87a, može se pogoršati (prigušna) karakteristika pojačala. Kao posljedica smanjenja ulaznog otpora protiče u ovakvom slučaju kroz kondenzator veća struja, nego bez NR, te na njemu dolazi do većeg pada napona. Budući da ovaj kondenzator predstavlja značajniji otpor tek kod posve niskih frekvencija, to će kao što se vidi iz sheme na sl. 87b, ako se kapacitet kon-

denzatora u odgovarajućoj mjeri ne poveća, doći do zapostavljanja napona najnižih frekvencija. Umjesto da se promijeni kondenzator, jednostavnije je spojiti otpor ispred postojećeg kondenzatora. Takvim spajanjem izbjegne se, da ulazna struja povećana NR-om protiče kroz kondenzator, pa na njemu ne dolazi do povećanog pada napona.



Sl. 87. Spajanjem otpora R_2 iza kapaciteta C povećava se pad napona na kapacitetu, te se time povećava prigušno izobličenje.



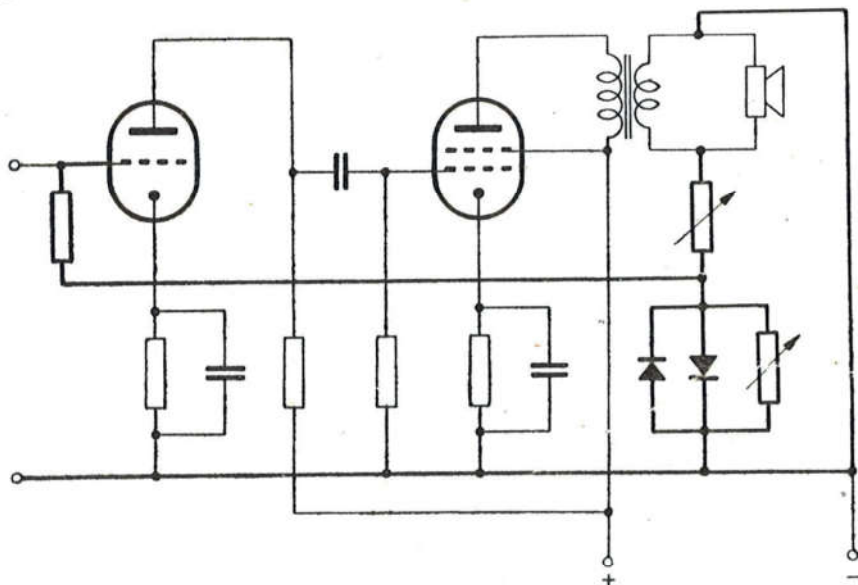
Sl. 88. Ako se ispred elektronke, kod koje je primijenjena paralelna NR, nalazi trioda, može u ovom stupnju doći do velikog harmoničnog izobličenja.

4. Smanjenje ulaznog otpora može uzrokovati veliko harmoničko izobličenje. — Smanjenje ulaznog otpora kod elektronke u paralelnoj NR predstavlja u isti čas i smanjenje opterećenog otpora za prethodnu elektronku. Ako je prethodna elektronka *trioda*, može zbog ovoga doći do velikog harmoničkog izobličenja. Smanjenjem opterećenog otpora postane radni pravac strmiji, zbog čega, kao što se vidi iz dijagrama na sl. 88., siječe horizontalnu os na takvom mjestu, da uz isti pobudni napon na rešetki dolazi do rezanja vrhova pozitivnih poluvalova anodnog napona. Kod pentode ove opasnosti nema, jer su njezine anodne karakteristike takvog oblika, da smanjivanjem opterećenog otpora ne može doći do ovakvog harmoničkog izobličenja.

6. Nelinearna negativna reakcija

1. Nelinearni otpor u reakcionoj grani može dodatno smanjiti harmoničko izobličenje. — Ispravljačke ćelije, kao što su na primjer selenske ili bakarno-oksidualne, imaju nelinearnu otpornu karakteristiku. U području nižih napona raste struja kod ovih ćelija brže nego napon. Drugim riječima: sa povećanjem napona otpor ćelije pada. Privede ili se serijskom spoju radnog otpora i ovakve ispravljačke ćelije sinusoidan napon, to će krivulja napona na ćeliji imati splošteno tjeme, napon će se izobličiti. Dakako, da će se to dogoditi samo u onoj poluperiodi, u kojoj ćelija struju propušta. U suprotnom smjeru otpor ćelije je razmjerno vrlo velik. Izobličenje napona koje uzrokuje ispravljačka ćelija, može se korisno upotrebiti u vezi sa NR.

Velik gubitak na pojačanju, s kojim se nužno mora računati, ako se želi imati znatnije smanjenje izobličenja, daje se ublažiti umetanjem ispravljačke ćelije u potencijometar za dobivanje reakcionog napona. Izobličenje napona dobiveno ovim načinom vrlo je slično onome, što ga uzrokuje elektronka. Zato je moguće, da se već sa slabijom NR, pa dakle s manjim gubitkom na pojačanju, dobije veće smanjenje izobličenja. U shemi na sl. 89. upotrebljene su



Sl. 89. Sklop s nelinearnim djeliteljem napona u reakcionoj grani.

dvije ćelije protusmjerno spojene, kako bi pomoću NR došlo do lineariziranja radne karakteristike elektronke u oba njezina koljena. Promjenljivi otpori služe za ugađanje karakteristika ćelija prema karakteristici elektronke. Veliki nedostatak ove metode smanjenja izobličenja leži u poteškoći, da se ove karakteristike usklade. Ako se još uzme u obzir, da se karakteristike ispravljačkih ćelija mijenjaju s temperaturom, onda se može razumjeti, zašto ova metoda nije našla primjenu u općoj praksi.

2. Neželjena nelinearna negativna reakcija. — O takvoj NR već smo govorili u odsjeku, u kojem smo obrazložili, kakav utjecaj na djelovanje NR ima struja pobudne rešetke. No postoji mogućnost, da u reakcionom djelatniku napona imamo nelinearan otpor i bez pojave struje rešetke. To je slučaj, kad se u djelatniku napona nalazi elektronka. Unutarnji otpor elektronke nije linearno ovisan o naponu. Ako se radi o velikim naponskim amplitudama, kao što je to slučaj, kad je jaka NR primijenjena kod izlazne elektronke prema shemi na sl. 85., onda glavni razlog izobličenju može biti upravo nelinearnost unutarnjeg otpora prethodne elektronke.

7. Neželjena negativna reakcija zbog katodne impedancije

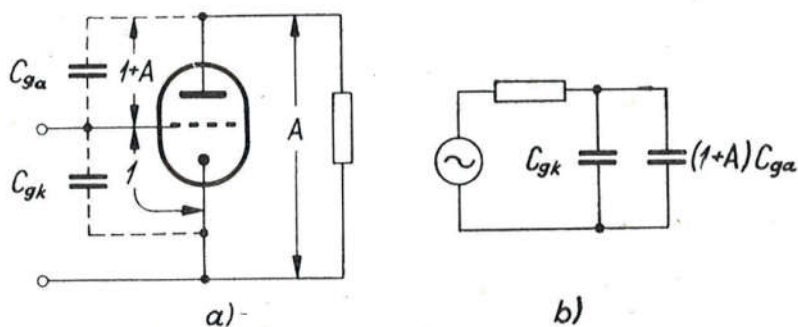
1. Katodna impedancija uzrokuje negativnu reakciju samo u jednom pojasu niskih frekvencija. — U normalnom slučaju katodna impedancija ima u prenošenom području frekvencija tako malenu vrijednost, da do NR ne dolazi. Tek kod sasvim niskih frekvencija kapacitivni otpor dobiva vrijednost, koja pada u red veličine katodnog otpora, te na katodnoj impedanciji nastaje reakcioni napon. Što je frekvencija niža, to je katodna impedancija veća, te je i NR jača. Ovo pojačavanje NR, i po tome slabljenje pojačanja, ide sve do onih posve niskih frekvencija, kod kojih kapacitivni otpor postaje znatno veći od katodnog otpora, tako da na koncu prema još nižim frekvencijama NR-u stvarno određuje samo katodni otpor. Katodna impedancija uzrokuje, dakle, NR-u ovisnu o frekvenciji samo u jednom frekventnom području. Iznad tog područja NR nema, a ispod toga područja NR je konstantna, neovisna o frekvenciji. Opširnije tumačenje utjecaja katodne impedancije na pojačanje i fazu dano je u glavi četvrtoj (poglavlje 3., odsjek 4.), gdje se govori o zakretničima faze.

2. Osušeni elektrolitski kondenzator kvari prigušnu karakteristiku pojačala. — U tonfrekventnim pojačalima katodni kondenzatori treba da imaju vrlo velik kapacitet, te se stoga za te svrhe upotrebljavaju elektrolitski kondenzatori. Kod ovakvih kondenzatora elektrolit se s vremenom djelomično isušuje, te se kapacitet smanjuje. U tom slučaju dolazi do NR na katodnoj impedanciji i u prenošenom području frekvencija. Posljedica ovoga je gubitak dubokih tonova u reprodukciji preko zvučnika. U ovakvom slučaju bolje je, barem što se tiče prigušne karakteristike, isušeni kondenzator ukloniti i bez zamjene, nego ga ostaviti u pojačalu.

8. Neželjena negativna reakcija preko kapaciteta anoda-signalna rešetka

1. Ulazna impedancija se smanjuje. — Parazitni kapacitet, što ga kod elektronke čini anoda sa signalnom rešetkom, uzrokom je, da kod visokih frekvencija dolazi do neželjene NR, odnosno do prigušivanja napona visokih frekvencija. Također u ovom slučaju radi se o paralelnoj NR, koja smanjuje ulaznu impedanciju elektronke. Samo što se ovdje radi o otporu, koji je ovisan o frekvenciji, i koji postaje dovoljno malen tek kod visokih tonskih frekvencija, pa do osjetnog smanjenja ulazne impedancije i pojačanja dolazi tek u ovom frekventnom području.

Privede li se kapacitetu rešetka-katoda C_{gk} , a to znači rešetki elektronke, napon od 1 volta, onda se kapacitet rešetka-anoda C_{ga} nalazi pod naponom od $(1 + A)$ volta, kao što je naznačeno na sl. 90a. Gledano s rešetke ovi naponi su



Sl. 90. U ulaznoj impedanciji elektronke sudjeluje i kapacitet rešetka-anoda, ali uvećan $(1 + A)$ puta.

međusobno protusmjerni, tako da iz izvora signala teče struja, koja je jednaka zbroju struja, koje teku kroz kapacitete. Što se tiče izvora signala sasvim je svedjedno, bio kapacitet C_{ga} spojen između rešetke i anode, ili uvećan $(1 + A)$ puta, ali spojen između rešetke i katode. Prema tome možemo uzeti da izvor signala opterećuju dva kapaciteta spojena paralelno: kapacitet rešetka-katoda i $(1 + A)$ puta veći kapacitet rešetka-anoda. Ovaj paralelni spoj kapaciteta spojen je u seriju s unutarnjim otporom izvora signala i izaziva na njemu to veći pad napona, što je frekvencija viša (sl. 90b). Povećanje ulaznog kapaciteta elektronke pod dinamičkim uvjetima poznato je pod imenom Miller-ov efekt.

2. Također kod pentode može postojati značajan kapacitet između rešetke i anode. — Kapacitet signalna rešetka-anoda ima praktičko značenje u vezi sa NR samo kod triode. Kod pentode je ovaj kapacitet vrlo malen. No to ne znači, da kod ove elektronke ne treba voditi računa o nehotičnoj NR. Vod prema anodi i vod prema signalnoj rešetki (izvan elektronke) tvore stanoviti kapacitet. Ovaj kapacitet može u nekom sklopu kod pentode biti manji, nego interelektrodni kapacitet kod triode, ali je zato kod pentode pojačanje A znatno veće, te i utjecaj ovog kapaciteta znatan. Sasvim je razumljivo, da kapacitet vodova treba i kod trioda uzeti u obzir, jer se on dodaje paralelno kapacitetu rešetka-anoda.

9. Kombiniranje negativne i pozitivne reakcije

1. Svojstva pozitivne reakcije. — Primjenom pozitivne reakcije dobiva pojačalo upravo suprotna svojstva od onih, koja ima uz primjenu negativne reakcije. Pozitivna reakcija djeluje tako, da:

1. povećava pojačanje pojačala,
2. povećava prigušno izobličenje,
3. povećava harmoničko izobličenje,
4. povećava napone smetnji u pojačalu,
5. povećava fazno izobličenje,
6. smanjuje stabilnost pojačanja,
7. strujna pozitivna reakcija smanjuje izlazni otpor pojačala, a naponska ga povećava.

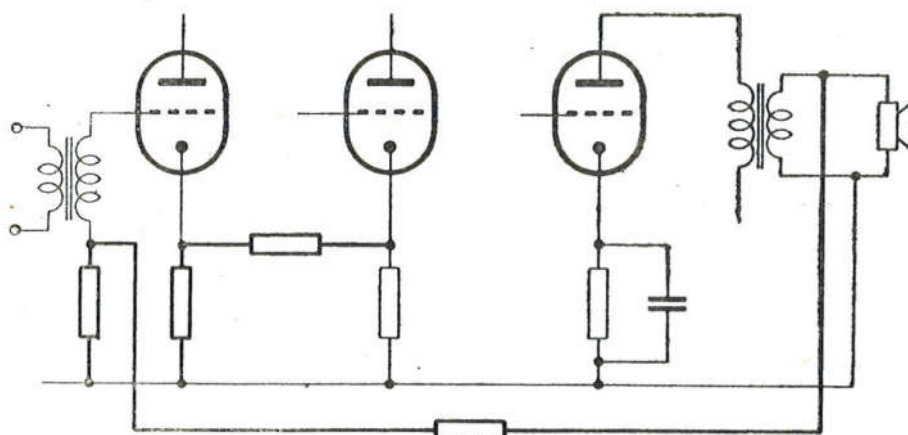
Kao što se iz gornjega vidi, pozitivna reakcija može da bude u pojačalu korisna jedino time, što povećava pojačanje, i eventualno, što na svoj način utječe na izlaznu impedanciju.

2. Povećanje negativne reakcije pomoću pozitivne reakcije. — U prvi čas može izgledati, da ovaj naslov izriče netočnu tvrdnju. Pozitivna reakcija djeluje suprotno negativnoj reakciji, dakle ona je smanjuje, a ne, da bi je povećavala. No uz stanovite okolnosti dobiva se ipak ono, što je rečeno u naslovu. Pokazat ćemo to na primjeru.

Neka se radi o trostepenom pojačalu, u kojem je treći stupanj izlazna elektronka. Pretpostavit ćemo, da izlazni stupanj ima kod najveće snage faktor izobličenja od 10% (bez NR), što je normalno za izlazne elektronke male snage. Prethodna dva stupnja ne će imati veće izobličenje od 1%, što zajedno s izobličenjem izlaznog stupnja u najgorem slučaju može da daje izobličenje od 11%. Primjenimo li deseterostruku NR, preko sva tri stupnja, izobličenje će pasti na nešto iznad 1%. No postoji mogućnost, da se izobličenje još više smanji, a da pojačanje pojačala ostane isto, kao sada s deseterostrukom NR. To ćemo postići tako, da ćemo preko prvog i drugog stupnja zajedno primijeniti pozitivnu reakciju, koja će pojačanje povećati, na primjer, dva puta. Time će izobličenje predstupnjeva porasti sa 1% na 2%, odnosno ukupno izobličenje sa 11% na 12%. Ali sada ćemo, da bismo dobili prijašnje pojačanje, moći primijeniti NR s padom pojačanja od 2×10 , dakle 20. Prema tome će i ukupno izobličenje biti 20 puta manje, to jest bit će 0,6%. S pozitivnom reakcijom možemo ići i dalje. Neka pozitivna reakcija poveća pojačanje 10 puta. Ukupno izobličenje može u tom slučaju postići vrijednost od 20%. Ali sada će i NR moći biti jača 10 puta! Uz pad pojačanja od $10 \times 10 = 100$ dobiva se izobličenje od 0,2%.

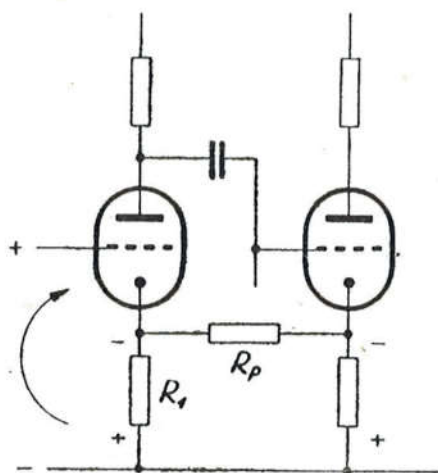
Kao što vidimo, uključivanjem pozitivne reakcije u petlju NR mogu se svojstva pojačala znatno poboljšati. Samo što se s ovim poboljšavanjem ne može ići po volji daleko. Treba se sjetiti, da pozitivna reakcija povećava fazno izobličenje. Budući da to isto kod najnižih i najviših frekvencija čini i negativna reakcija (NR postaje kod tih frekvencija pozitivna), to se obje reakcije potpomažu, što može dovesti do smetnji i onemogućiti rad pojačala.

3. Pozitivna reakcija od katode na katodu. — Na sl. 91. vidimo shemu jednog pojačala, kod kojeg je primijenjena negativna i pozitivna reakcija na onaj način, kao što je gore opisano. Spajanjem katoda dviju susjednih elek-

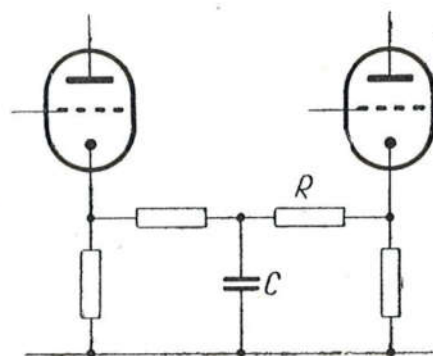


Sl. 91. Trostepeno pojačalo s negativnom reakcijom preko sva tri stupnja i pozitivnom reakcijom preko prva dva stupnja.

tronki dobiva se pozitivna reakcija. Da je zaista tako, vidima iz sl. 92. Ako rešetki prve elektronke privedemo pozitivni poluval izmjeničnog napona, dobit ćemo na anodi iste elektronke i na rešetki slijedeće elektronke negativni



Sl. 92. Pomoću predznaka, koji označuju momentane poluvalove izmjeničnih napona, može se utvrditi, da se međusobnim vezivanjem katoda dvaju susjednih stupnjeva dobiva pozitivna reakcija.



Sl. 93. Pomoću RC-filtra smanjuje se reakcioni napon kod viših frekvencija, čime se otklanja nepovoljan utjecaj pozitivne reakcije u tom frekventnom području.

poluval. Na katodnom otporu druge elektronke (gledano s katode) vladat će pozitivni poluval napona. Ovaj napon će se u omjeru otpora R_p i R_1 podijeliti, i kao napon na otporu R_1 prispjeli na rešetku prve elektronke (izmjenična komponenta napona na otporu R_1 , koja nastaje uslijed protoka izmjenične

anodne struje prve elektronke, može se zanemariti). Budući da je vraćeni napon istog predznaka kao i napon, koji je promjenu izazvao, to je reakcija pozitivna.

4. Ograničena pozitivna reakcija. — Ima slučajeva, kada nije potrebno poboljšavati učinak NR preko cijelog frekventnog područja, koje pojačalo prenosi. Ako, na primjer, izlazni transformator ima premalo željeza ili primarnih zavoja, on će izobličivati kod najnižih frekvencija. Da se izbjegnu neprilike od pozitivne reakcije kod najviših frekvencija, moguće je ograničiti djelovanje pozitivne reakcije samo na područje do nekoliko stotina herca, to jest upravo na ono područje, u kojem zbog transformatora dolazi do najvećeg izobličenja. Na sl. 93. se vidi, kako se to može izvesti pomoću RC-filtra.

5. Smanjivanje izlazne impedancije pojačala pomoću kombinacije negativne i pozitivne reakcije. — Da bi zvučnik što vjernije reproducirao tranzijente, potrebno je da naponska NR u što većoj mjeri smanji izlaznu impedanciju pojačala. No jaka NR uzrokuje veliki gubitak na pojačanju. Malenu izlaznu impedanciju možemo dobiti i uz slabiju naponsku NR, ako pojačalu dodamo još *strujnu pozitivnu reakciju*. To se može izvesti na posve isti način, kao što je učinjeno u shemi na sl. 91., to jest vezom katoda dviju susjednih elektronki preko jednog otpora, samo što u ovom slučaju treba otporom vezati katodu izlazne elektronke s katodom prethodne elektronke. Kombiniranjem naponske negativne reakcije, i strujne pozitivne reakcije može se postići, da izlazna impedancija ima vrijednost nula, štoviše, da bude negativna.

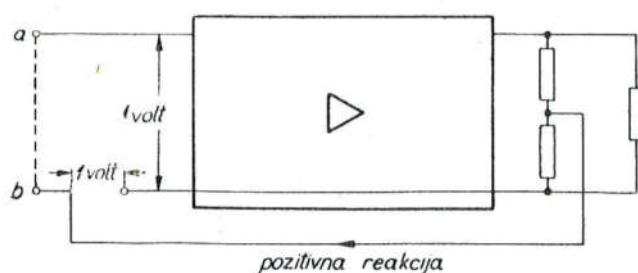
GLAVA ČETVRTA

FAZNI ODNOSI U POJAČALU I NEGATIVNA REAKCIJA

1. Oscilator

1. Reakcioni napon istofazan i iste veličine kao napon na rešetki. — Ulazni napon je kod NR veći od napona na rešetki za vrijednost reakcionog napona. Kod pozitivne reakcije je obrnuto: *ulazni napon je manji od napona na rešetki*, i to za toliko, koliko iznosi reakcioni napon. A što onda, ako kod pozitivne reakcije reakcioni napon ima takvu vrijednost, da je jednak naponu, koji je priveden rešetki? U tom slučaju ulazni napon postaje jednak nuli! Promotrit ćemo поближе takav slučaj, jer je on za nas naročito zanimljiv.

Privest ćemo ulazu nekog pojačala napon od 1 volta. Neka je pojačanje pojačala 10, tako da ćemo na izlazu dobiti 10 volta. Odgovarajućim spojem vratit ćemo deseti dio izlaznog napona (1 volt) na ulaz, ali tako, da imamo



Sl. 94. Pojačalo u pozitivnoj reakciji.

pozitivnu reakciju, da reakcioni napon ima, dakle, posve istu fazu, kao i napon, koji smo prije doveli rešetki. Ako se radi o serijskoj reakciji, kao što je naznačeno na sl. 94., oba napona (ulazni i reakcioni) zbrajat će se, te ćemo na rešetki imati napon od 2 volta. Spojimo sada ulazne priključnice pojačala *a* i *b* na kratko. Time će nestati ulaznog napona, a preostat će samo reakcioni napon od 1 volta. Dobili smo isti slučaj, koji smo imali u početku: na rešetki vlada napon od 1 volta, što na izlazu daje 10 volta. Samo u jednom je bitna razlika. U početku smo onaj napon od 1 volta dobivali iz posebnog izvora, a sada ga dobivamo s izlaza pojačala. Za samo pojačalo nije važno, odakle

dolazi napon na rešetku. Za njega je važno jedino to, da je napon iste veličine i faze, i ono će u oba slučaja dati isti izlazni napon. No ako nije važno za pojačalo, važno je za nas, odakle dolazi pobudni napon pojačala. Dobiva li se taj napon s izlaza pojačala, *onda pojačalo samo sebe pobuđuje, onda je ono samo za sebe, bez ikakvog utjecaja izvana, proizvađač izmjeničnog napona ili električkih oscilacija*. U takvom slučaju pojačalo postaje *oscilator*.

2. Reakcioni napon iste faze, ali veći od napona na rešetki. — U gornjem razmatranju pretpostavili smo, da je reakcioni napon upravo takve veličine, kao i ulazni napon bez primjene reakcije, to jest, da jedan i drugi ima vrijednost od 1 volta. Zato smo u oba slučaja — kad pojačalo radi kao čisto pojačalo i kao oscilator — dobili isti izlazni napon od 10 volta. A što bi se u ovom slučaju dogodilo, kad bi reakcioni napon bio veći od 1 volta, kad bi, na primjer, bio peti dio izlaznog napona i iznosio 2 volta? Tada bi se također izlazni napon povećao, pa bi iznosio 20 volta. No sada bi i reakcioni napon porastao, jer peti dio od 20 volta je 4 volta. Ovo bi dalo izlazni napon od 40 volta. Time bi se reakcioni napon povećao na novu vrijednost, što bi izazvalo daljnje povećanje izlaznog napona. Dokle tako? Odgovor nije težak! Gornja granica anodne struje elektronke je struja zasićenja. Prema tome izmjenična komponenta anodne struje ne može rasti u nedogled, već samo do vrijednosti, koju određuje struja zasićenja. A kad ne može dalje rasti izmjenična struja, ne može ni izlazni napon elektronke, odnosno pojačala. Što je veća izmjenična komponenta anodne struje, to je zbog zakrivljenosti radne karakteristike manja (srednja) radna strmina elektronke, odnosno pojačala, te je pojačanje manje. Na koncu se, dakle, porast izlaznog napona pojačala kao oscilatora zaustavi. Ravnoteža se uspostavi onda, kad se reakcioni napon βA zbog opadanja pojačanja A izjednači s ulaznim naponom, kojim se dobiva dotični A , to jest, kad postane $\beta A = 1$.

3. Uvjeti za nastajanje samooscilacija. — Iz gore izloženog izlazi, da pojačalo postaje oscilator, ako su ispunjena ova dva uvjeta:

1. ako je reakcioni napon u fazi s ulaznim naponom,
2. ako je faktor reakcije βA jednak jedinici, ili je veći od jedinice.

Pojačalo u pozitivnoj reakciji može da počne oscilirati i bez poticaja ulaznim naponom, dakle bez poticaja izvana. Ne možemo, naime, nikad smatrati, da pojačalo savršeno miruje, jer se u njemu uvijek rađaju naponi, koji ga mogu potaknuti na oscilacije. Ako ništa drugo, takvi naponi su naponi šuštanja u elektronkama. Nije važna veličina tih poticajnih napona, jer kao što vidimo iz uvjeta za oscilacije — $\beta A = 1$ — jednačba ne vodi računa o veličini napona. Makar se radilo o mikro-naponima, oni će malo pomalo, kako je gore izloženo, rasti, i na koncu postići vrijednost, na kojoj će se ustaliti. Ovaj proces porasta amplituda, proces utitravanja, obično traje tek maleni dio sekunde.

4. Negativna reakcija se pretvara u pozitivnu reakciju. — O pozitivnoj reakciji govorili smo već prije i izložili smo način, kako se ona može korisno primijeniti u vezi sa NR. No kod takve pozitivne reakcije mora reakcioni

napon biti mnogo niži od one vrijednosti, koja izaziva samooscilacije (βA mora biti mnogo manje od 1). Iz toga ne smijemo zaključiti, da nas u vezi s problemima NR ne može zanimati slučaj, kad pojačalo postane oscilator. Ono to postane bez naše želje i volje, i upravo su samooscilacije onaj problem, koji konstruktoru zadaje najviše brige u radu sa NR.

Uvjet za NR, da je reakcioni napon pomaknut za 180° prema naponu na rešetki, ispunjen je samo kod jedne frekvencije, ili praktički samo u području srednjih frekvencija, budući da je u ovom području fazno izobličenje pojačala maleno. Kod najviših i najnižih frekvencija fazno izobličenje pojačala je veliko, te kod višestepenih pojačala mogu uz jaču NR biti ispunjeni uvjeti za nastajanje oscilacija. Razmotrimo takav slučaj na jednom primjeru. Neka se radi o trostepenom pojačalu s posve jednakim stupnjevima. Kod stanovite visoke i stanovite niske frekvencije doći će do faznog zaokreta od 60° u svakom stupnju pojačala, odnosno do zaokreta od $3 \times 60^\circ = 180^\circ$ u sva tri stupnja. Ako se kod ovog pojačala primijeni NR preko sva tri stupnja, to će kod frekvencije, kod koje dolazi do faznog zaokreta od 60° po stupnju, reakcioni napon biti u fazi s naponom na rešetki prvog stupnja. Kod te frekvencije bit će, dakle, ispunjen prvi uvjet, da pojačalo postane oscilator. Ispunjenje drugog uvjeta ovisi o stupnju NR. Ako je NR dovoljno jaka, bit će reakcioni napon jednak naponu na rešetki ulazne elektronke, ili čak veći od ovog napona, te će doći do samooscilacija.

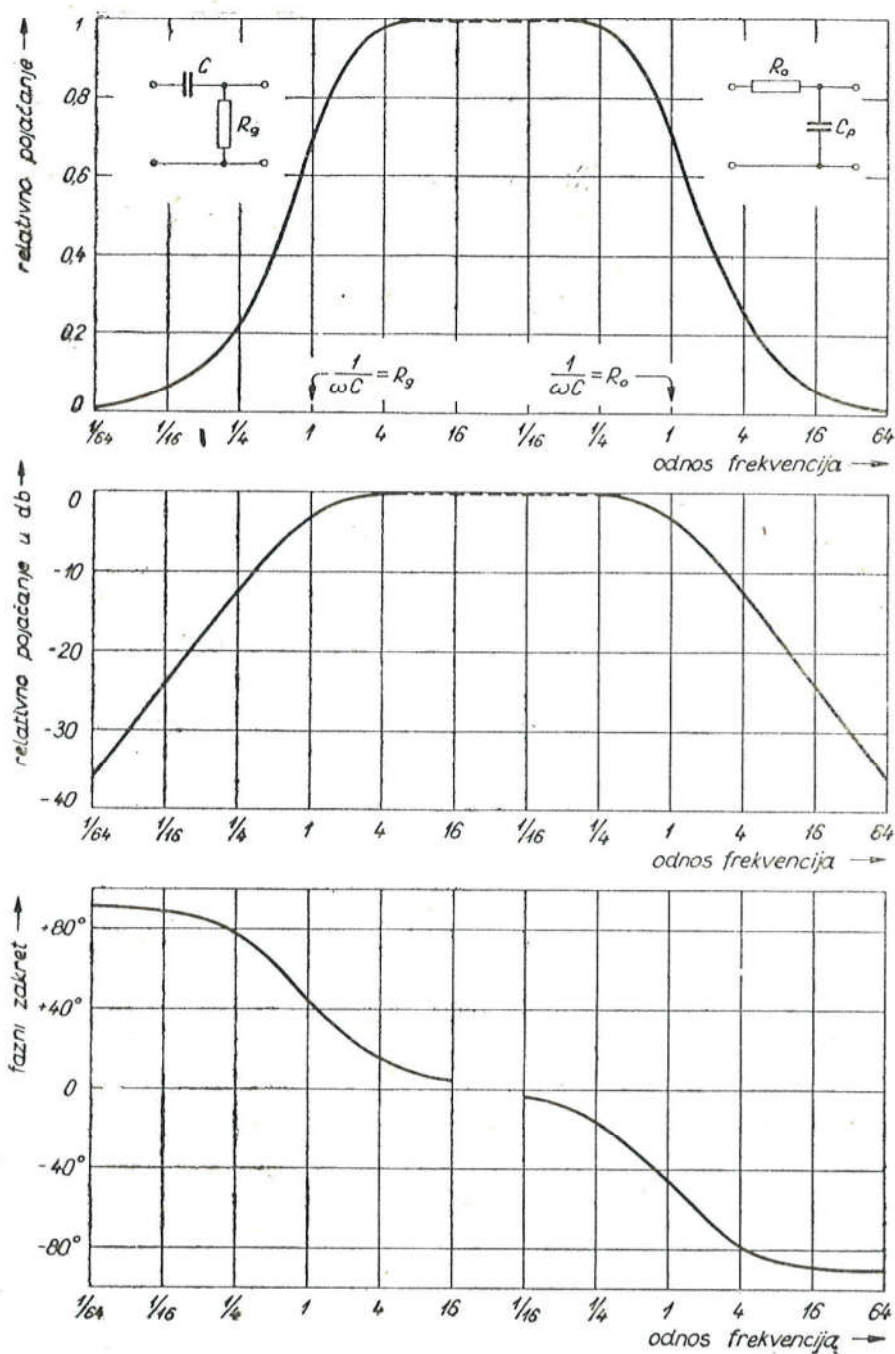
Oscilacije kod pojačala u NR posljedica su, kao što vidimo, faznog izobličenja. No postoji pri tome jedna povoljna okolnost, a to je ta, da kod frekvencija, kod kojih imamo fazno izobličenje, imamo u normalnom slučaju istodobno i smanjenje pojačanja, tako da će samooscilacije nastupiti tek kod vrlo jakih NR.

2. Zakretači faze u pojačalu

Svaki sklop u pojačalu, kod kojega je napon na sastavnim elementima ovisan o frekvenciji, uzrokuje zakret faze. U slijedećim recima dat ćemo pregled takvih normalnih sklopova u pojačalu.

1. Međustepeni RC-elementi. — Između svaka dva susjedna stupnja otpornog pojačala nalaze se sklopovi, koji uzrokuju prigušivanje napona ekstremnih frekvencija. Na napone najnižih frekvencija utječe spojni kondenzator u zajednici s odvodnim otporom. Napone najviših frekvencija prigušuje sklop, koji tvori efektivni unutarnji otpor prethodnog stupnja s parazitnim kapacitetima. Dijagram na sl. 95. prikazuje naponsku i faznu karakteristiku jedno-stepenog otpornog pojačala, dakle, takvog, u kojem se nalazi samo jedan RC-spoj za niske, i jedan RC-spoj za visoke frekvencije. Ove karakteristike vrijede uz pretpostavku, da drugih prigušnih sklopova, odnosno zakretača faze (na primjer, u katodi ili u zaštitnoj rešetki) nema. Jedna od prigušnih karakteristika prikazana je s linearnom skalom na ordinati, a druga s logaritmičkom (linearnom u decibelima). Iz ovog drugog dijagrama se vidi da kod dovoljno niskih i kod dovoljno visokih frekvencija naponska karakteristika ima strminu od 6 decibela po oktavi. Najveći mogući zakret faze, do kojeg dolazi od jednog ovakvog RC-spoja, iznosi 90° . Kao što se vidi iz faznog dijagrama, zakret faze od blizu 90° nastaje tek kod najnižih i najviših frekvencija. Strmina na-

ponske karakteristike od 6 decibela po oktavi vezana je uz fazni zakret od 90° . Kod dvostepenog otpornog pojačala strmina karakteristike u području ekstremnih frekvencija je dvostruko veća, dakle 12 decibela po oktavi, a

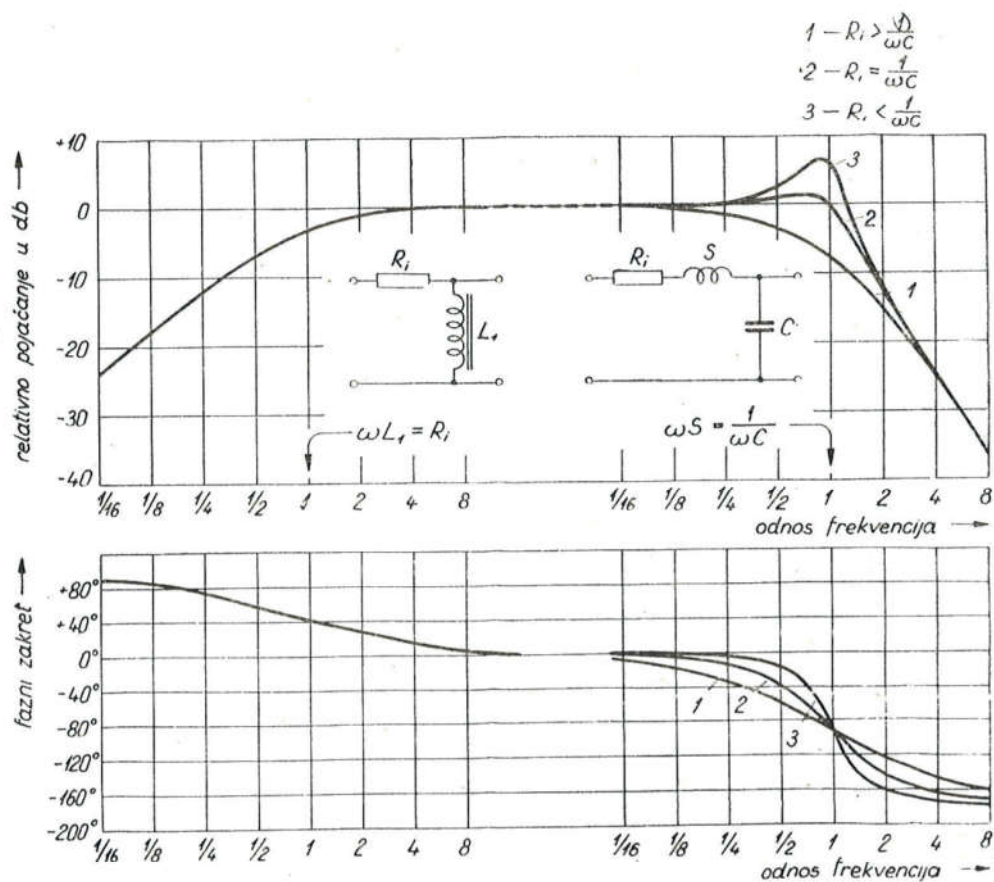


Sl. 95. Prigušne karakteristike i fazna karakteristika jednostepenog otpornog pojačala.

fazni je zakret također dva puta veći, odnosno 180° . Svaki daljnji stupanj otpornog pojačala povećava strminu karakteristike za 6 decibela po oktavi, a ekstremni fazni kut za 90° .

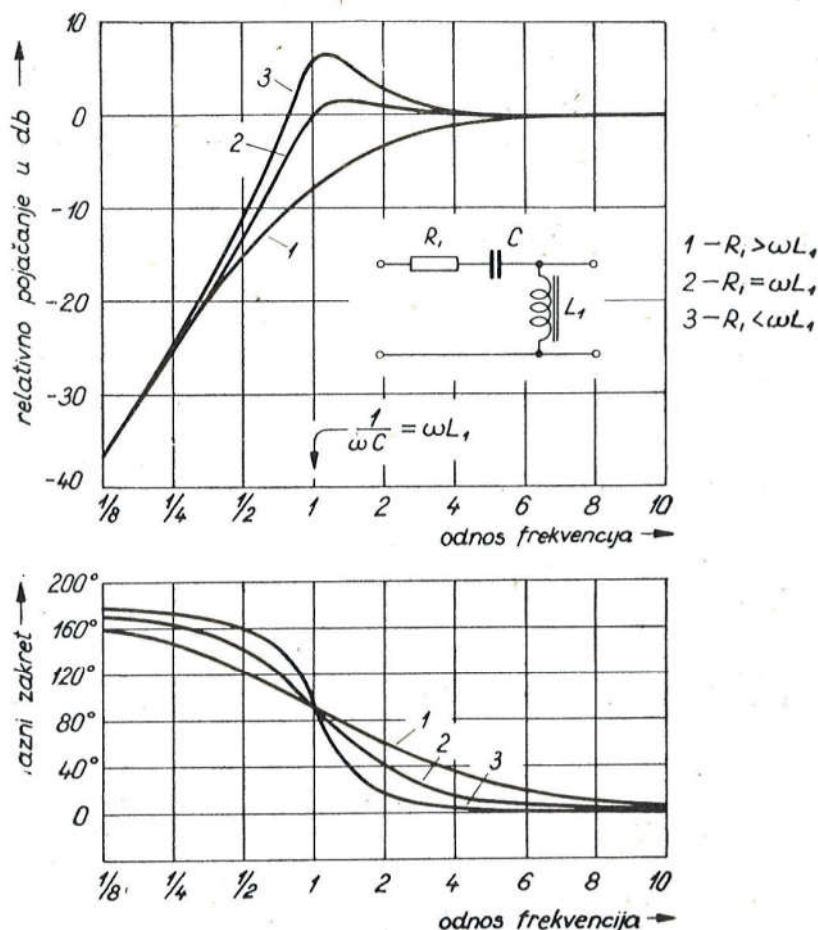
2. Ulazni, odnosno međustepeni transformator. — Ovakav transformator se u području niskih frekvencija ponaša kao induktivitet, kojemu je unutarnji otpor generatora (kod ulaznog transformatora unutarnji otpor izvora signala, a kod međustepenog efektivni unutarnji otpor prethodnog stupnja) spojen u seriju. Prema tome će naponska i fazna karakteristika biti posve slična onoj, koju u tom području frekvencija ima RC-spoj.

Ako je ulazni, odnosno međustepeni transformator na sekundarnoj strani opterećen samo ulaznim kapacitetom elektronke, onda se ovakav transformator zbog svog rasipnog induktiviteta ponaša kod visokih frekvencija kao serijski titrajni krug. Oblik naponske karakteristike ovisit će uz dani induktivitet i kapacitet o veličini unutarnjeg otpora generatora. Kod dovoljno visokih frekvencija napon na sekundaru (na kapacitetu) opada iz dva razloga: prvo, što otpor rasipnog induktiviteta poraste na dvostruku vrijednost, kad se frekvencija udvostruči, a drugo, što uz udvostručenje frekvencije otpor kapaciteta padne na polovinu. Zato se u tom području frekvencija karakteristika spušta sa strminom od 12 decibela po oktavi (kod dva puta više frekvencije napon je četiri puta niži). Najveći fazni zakret iznosi u ovom slučaju 180° . Veličina faznog zakreta ovisi i o unutarnjem otporu generatora, kao što se vidi iz dijagrama na sl. 96.



Sl. 96. Prigušna i fazna karakteristika ulaznog transformatora.

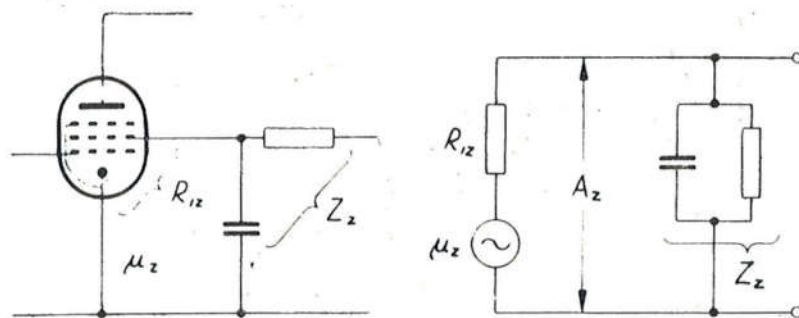
Ulazni transformator može i u području niskih frekvencija imati karakteristiku sličnu onoj, kakvu ima u području visokih frekvencija. To je slučaj, kad je transformator s anodom prethodne elektronke vezan pomoću kondenzatora, kad se dakle radi o paralelnom napajanju. Ovakav sklop uzrokuje kod ekstremnih niskih frekvencija opadanje naponsko-frekventne karakteristike od 12 decibela po oktavi, odnosno fazni zakret od 180° (sl. 97.).



Sl. 97. Prigušna i fazna karakteristika paralelno napajanog ulaznog transformatora, i to za područje niskih frekvencija.

3. Impedancija u zaštitnoj rešetki. — Kod pentode se napon za zaštitnu rešetku najčešće dobiva tako, da se zaštitna rešetka spoji s izvorom napona preko jednog otpora. Djelovanjem signala nastaje u struji zaštitne rešetke izmjenična komponenta, koja na ovom otporu izaziva izmjeničnu komponentu napona. Budući da je ova naponska komponenta u protufazi prema signalu, to dolazi do smanjenja pojačanja elektronke. Kako bi izmjenična komponenta struje mimoišla otpor, stavlja se između zaštitne rešetke i katode kondenzator. Kapacitivni otpor ovog kondenzatora mora i za najniže frekvencije, koje pojačalo ima prenijeti, biti dovoljno malen, da ne bi došlo do zapostavljanja napona tih frekvencija. U vezi sa NR treba voditi računa o djelovanju ovog kondenzatora također u području ispod frekvencija, koje dolaze u obzir kod pojačavanja. U tom području frekvencija kondenzator (u vezi s ostalim elementima) uzrokuje smanjenje pojačanja i zakret faze.

Katoda, signalna i zaštitna rešetka pentode predstavljaju zapravo triodni sistem, kojemu se u anodnom krugu nalazi impedancija sastavljena od redukcionog otpora i filtarskog kondenzatora. Nadomjesna shema ove triode prikazana je na sl. 98. Faktor pojačanja triode označen je sa μ_z , njezin unutarnji otpor sa R_{iz} , a izmjenični anodni napon uz 1 volt na signalnoj rešetki, dakle pojačanje, sa A_z . Pojačanje pentode je ovisno o veličini napona A_z . Dok je impedancija Z_z vrlo malena prema otporu R_{iz} , onda je napon A_z praktički jednak nuli, te je pojačanje pentode normalno. U području vrlo niskih frekvencija kapacitivni otpor kondenzatora poraste, te se impedancija u zaštitnoj rešetki poveća, zbog čega dolazi do pojave napona A_z . Ovaj napon djeluje na mjestu pobudne rešetke protufazno naponu signala, ali umanjen μ_z puta. Zato stvarno na pobudnoj rešetki djeluje napon signala umanjen za A_z/μ_z . Odatle manje pojačanje pentode, kad dođe do utjecaja impedancije zaštitne rešetke. Prema tome pojačanje s ovim utjecajem prema pojačanju bez njega odnosi se kao $(1 - A_z/\mu_z)$ prema 1, odnosno kao $(\mu_z - A_z)/\mu_z$. U brojniku ovog po-



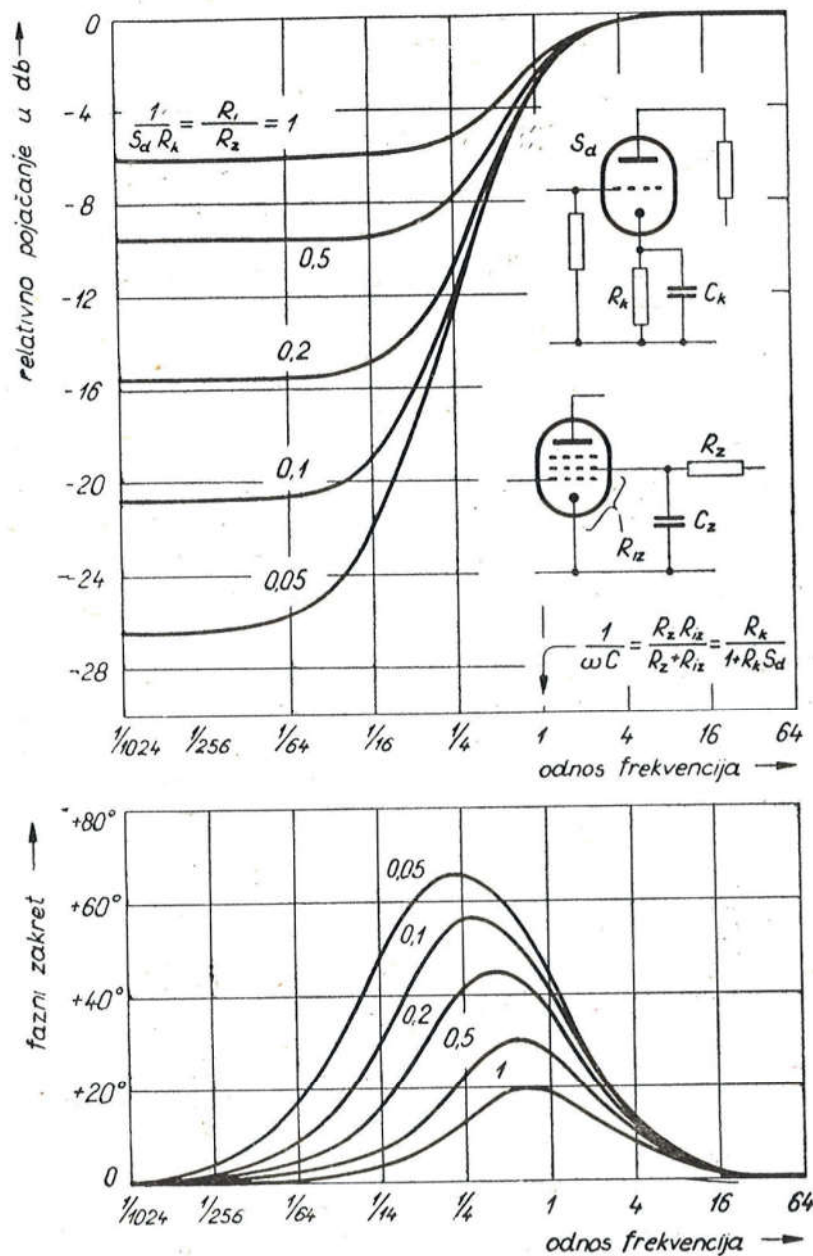
Sl. 98. Katoda, signalna i zaštitna rešetka kod pentode predstavljaju triodni sistem, u kojemu je impedancija u zaštitnoj rešetki anodna impedancija.

sljednog razlomka vidimo (vektorsku) razliku napona, koja zapravo predstavlja napon na otporu R_{iz} na sl. 98. Napon μ_z vlada na serijskom spoju otpora R_{iz} i impedancije Z_z . Iz ovog slijedi, da gornji odnos napona možemo izjednačiti s odnosom odgovarajućih otpora, to jest s odnosom $R_{iz}/(R_{iz} + Z_z)$ (ovdje se u nazivniku radi o vektorskom zbroju). Dakle: *pojačanje pentode mijenja se s frekvencijom isto onako, kao što se mijenja napon na otporu R_{iz} kod serijskog spoja sastavljenog od Z_z i R_{iz} .*

U području posve niskih frekvencija otpor kondenzatora toliko poraste, da ga s obzirom na njegov utjecaj možemo prema vrijednosti redukcionog otpora zanemariti. Tada pojačanje postane neovisno o frekvenciji. Kondenzator prema tome stvara na naponskoj karakteristici stepenicu. U prelaznom području pojačanje se postepeno diže s porastom frekvencije. Do faznog zakreta dolazi samo u prelaznom području, pri uzlazu s donje stepenice na gornju. Što je veći redukциони otpor prema unutarnjem otporu triodnog sistema, to je strmiji uzlaz naponske karakteristike u prelaznom području, i to veći je fazni zakret (sl. 99.).

4. Katodna impedancija. — Također katodni kondenzator mora imati takav kapacitet, da njegov utjecaj u području frekvencija, koje pojačalo ima prenijeti, bude zanemarivo malen. No iz praktičkih razloga ovaj kapacitet ne može biti tako velik, da bi bio bez utjecaja i u području frekvencija ispod onih, koje se želi prenijeti.

Naše razmatranje utjecaja katodne impedancije počeo ćemo dovođenjem napona od 1 volta između rešetke i katode. Ovaj će napon uzrokovati u anodnom krugu izmjeničnu komponentu struje, koja će imati vrijednost radne strmine elektronke S_d . Prolazeći kroz katodnu impedanciju Z_k ova struja



Sl. 99. Prigušne i fazne karakteristike, koje ima elektronka uz utjecaj katodne impendancije, odnosno impendancije zaštitne rešetke.

će izazvati pad napona $S_d \cdot Z_k$. Prema tome ćemo na ulaz morati dovesti napon od $(1 + S_d Z_k)$ volta, da bismo između rešetke i katode imali prijašnji napon od 1 volta (u gornjem izrazu radi se o vektorskom zbroju napona). U području frekvencija, kod kojih je kondenzator praktički kratki spoj (u odnosu

na vrijednost otpora R_k), napon na rešetki jednak je ulaznom naponu, to jest iznosi 1 volt. Međusobni odnos ovih ulaznih napona predstavlja odnos pojačanja kod viših frekvencija prema pojačanju kod posve niskih frekvencija:

$$\frac{A'}{A} = \frac{1}{1 + S_d Z_k} \quad (57)$$

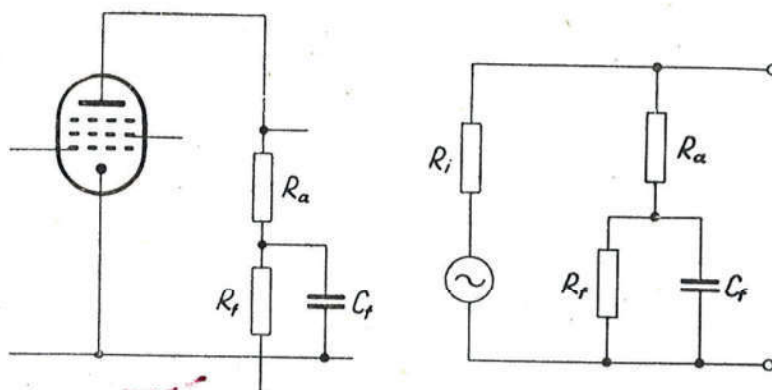
Kod triode ova strmina je radna strmina, dok je kod pentode moguće za S_d uvrstiti statičku strminu S , budući da kod nje praktički nema razlike između jedne i druge strmine.

Strmina elektronke je kvocijent struje i napona. Recipročna vrijednost strmine je kvocijent napona i struje, dakle ima karakter otpora. Prema tome u gornju jednadžbu možemo umjesto S_d uvrstiti $1/R$, te imamo:

$$\frac{A'}{A} = \frac{1}{1 + \frac{1}{R} \cdot Z_k} = \frac{R}{R + Z_k} \quad (58)$$

Na taj način dobili smo odnos otpora, iz kojeg se vidi, da se pojačanje mijenja na posve isti način, kako se mijenja uslijed djelovanja impedancije zaštitne rešetke. Jedino što se radi o drugim otporima. Zato će i za ovaj slučaj vrijediti isti dijagram (sl. 99.). i isti zaključci, koje smo naveli u vezi s impedancijom u zaštitnoj rešetki.

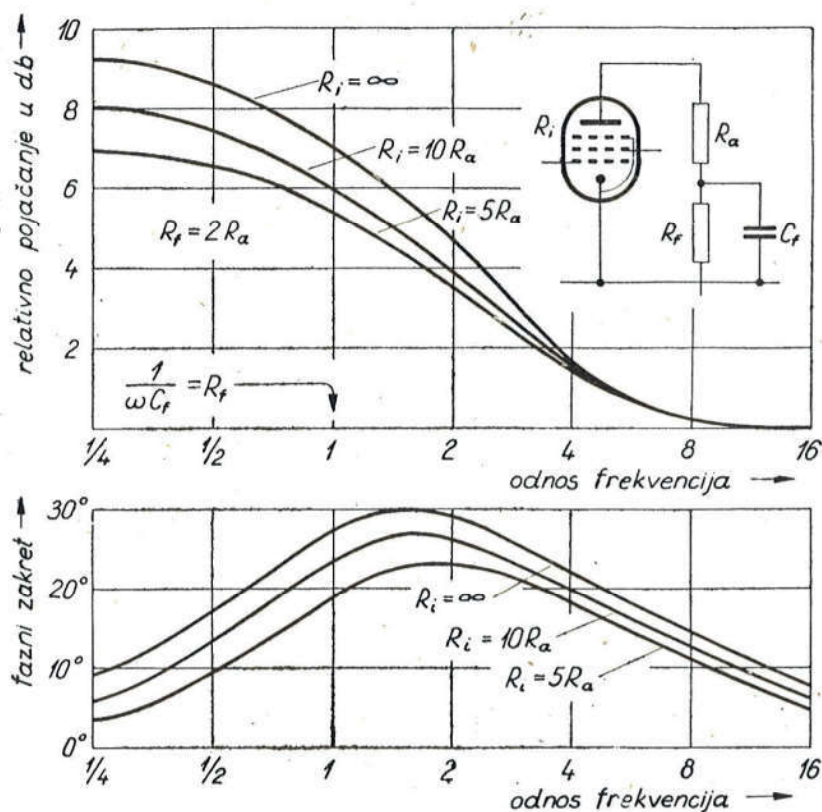
5. Anodni filter. — U području sasvim niskih frekvencija pojavljuje se kao zakretač faze i anodni filter. Ovaj filter služi za filtriranje anodnog napona od napona brujanja, i kao zapor protiv galvanske reakcije. Kao što se vidi iz sheme na sl. 100, ovaj filter je spojen u seriju s anodnim otporom,



Sl. 100. Anodni filter R_f — C_f utječe kod pentode na pojačanje u području najnižih frekvencija.

te kao takav kod dovoljno niskih frekvencija povećava anodnu impedanciju elektronke. Ako se radi o triodi, onda to nema gotovo nikakvog značenja, jer je kod triode anodni otpor (odnosno impedancija) mnogo veći od njezinog unutarnjeg otpora, te izlazni napon praktički ne ovisi o promjeni anodnog otpora, odnosno impedancije (triode je generator konstantnog napona). Naprotiv, kod pentode je anodni otpor (ili impedancija) u normalnom slučaju mnogo manji od njezinog unutarnjeg otpora, te se svaka promjena anodne impedan-

cije odrazuje kao promjena izlaznog napona, odnosno kao promjena pojačanja (pentoda je generator konstantne struje). Budući da se radi o impedanciji, dakle kompleksnom otporu, to će se uz promjenu napona pojaviti i zakret faze. Uz dani kapacitet veličina zakreta ovisi o odnosu unutarnjeg otpora elektronke prema anodnom otporu, a također o odnosu anodnog otpora prema filtarskom otporu. Ovisnost pojačanja i faznog kuta o frekvenciji uz različite ove odnose prikazana je dijagramima na sl. 101. i 102.

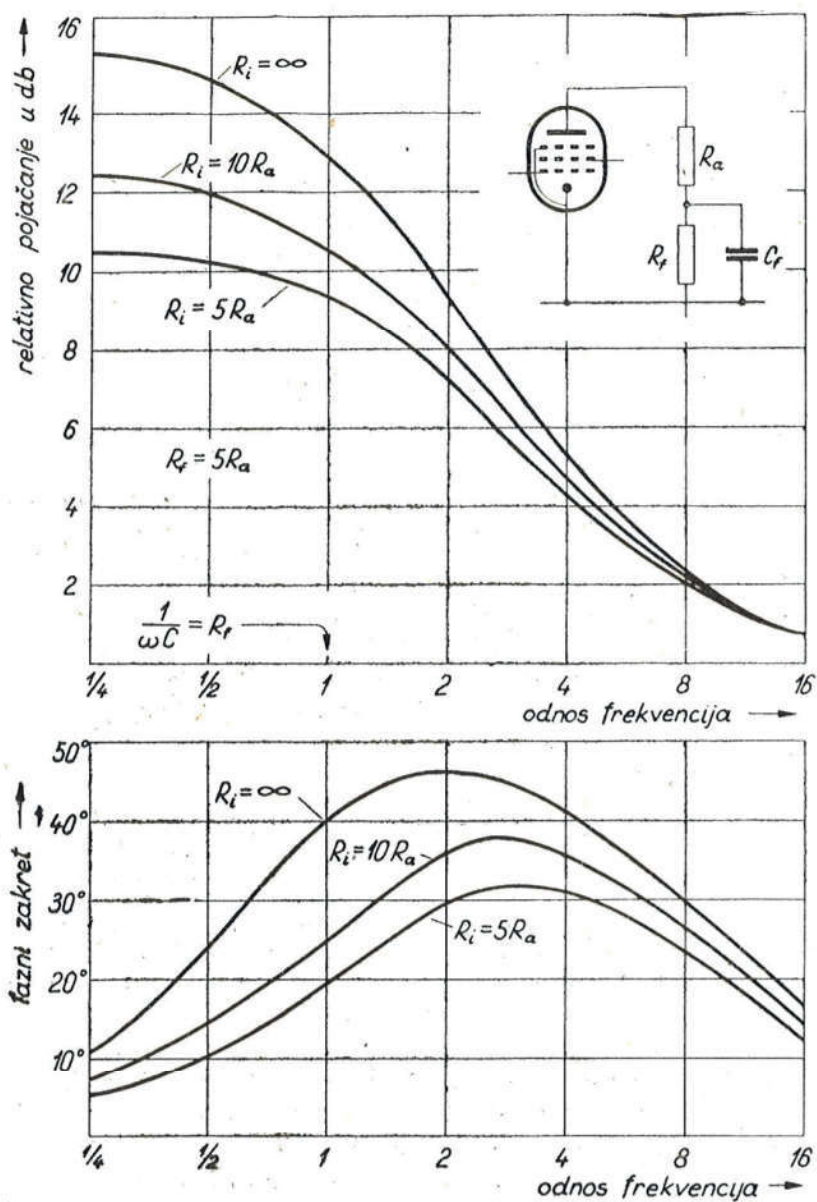


Sl. 101. Utjecaj anodnog filtra na pojačanje i fazu uz različite vrijednosti unutarnjeg otpora pentode, i to za slučaj, kad je filtarski otpor dva puta veći od anodnog otpora.

6. Izlazni transformator. — Ono, što je za područje niskih frekvencija rečeno za ulazni, odnosno međustepeni transformator, vrijedi i za izlazni transformator (opadanje naponske karakteristike za 6 decibela po oktavi). Samo što u ovom slučaju kao serijski otpor imamo paralelni spoj unutarnjeg otpora elektronke i opterećnog otpora, dakako, transformiranog na primarnu stranu. Kod visokih frekvencija djeluje rasipni induktivitet spojen u seriju s unutarnjim otporom elektronke i opterećnim otporom. Rasipni induktivitet kod dovoljno visokih frekvencija poprima otpornu vrijednost, koja je mnogo viša nego kod ostala dva otpora, te u ovom području frekvencija naponska karakteristika također opada sa 6 decibela po oktavi. Prema tome izlazni transformator ima naponsku karakteristiku, koja je posve slična onoj kod R—C—pojačala (sl. 95.). Fazni zakret kod ekstremnih frekvencija ne će dakle prelaziti 90°. Kao što ćemo kasnije vidjeti, kod vrlo visokih frekvencija izlazni

transformator se ponaša drugačije, nego što je ovdje navedeno za idealizirani slučaj, to jest uz pretpostavku, da u ovom području frekvencija djeluje od reaktivnih elemenata samo rasipni induktivitet.

Kod paralelno napajanog izlaznog transformatora može u području najnižih frekvencija doći do zakreta faze od 180° .

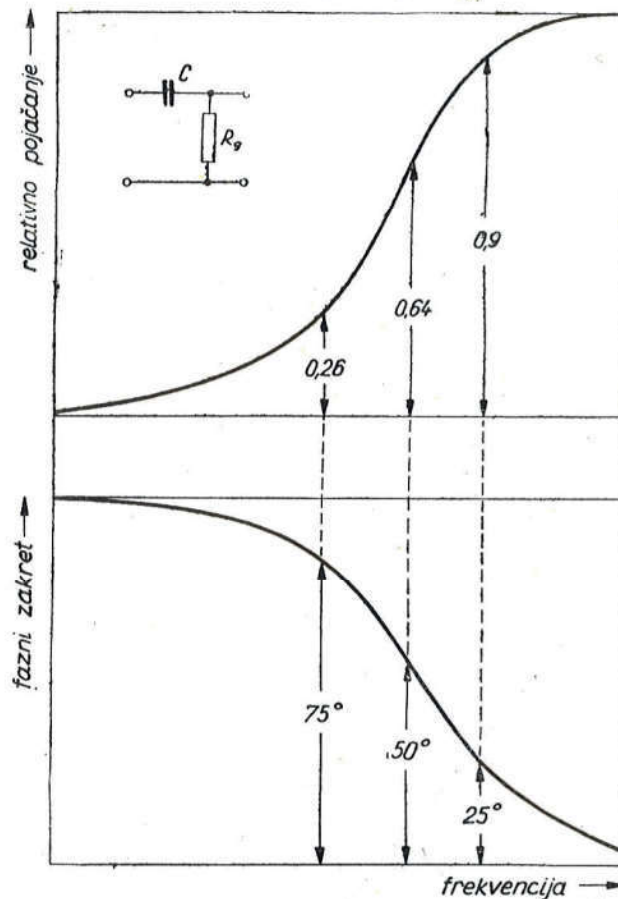


Sl. 102. Utjecaj anodnog filtra na pojačanje i fazu uz različite vrijednosti unutarnjeg otpora pentode. Ove karakteristike vrijede za slučaj, kad je filterarski otpor pet puta veći od anodnog otpora.

3. Nehotično izdizanje napona krajnjih frekvencija kod primjene negativne reakcije preko više stupnjeva

1. Negativna reakcija kod jednog stupnja smanjuje prigušno izobličenje. — Kako bi bilo razumljivije, što se događa kod više stupnjeva u NR, promotrit ćemo najprije ono, što se događa kod jednog stupnja.

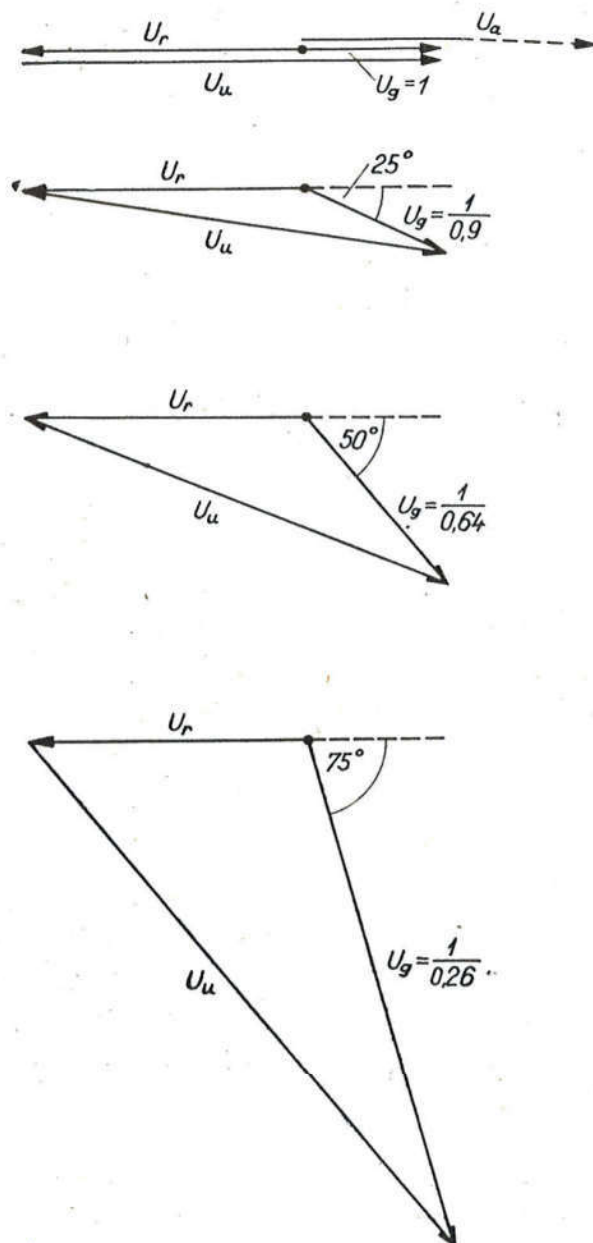
Slika 103. poznata nam je već otprije. U njoj je dijagramom prikazana ovisnost izlaznog napona i njegove faze o frekvenciji kod jednostepenog poja-



Sl. 103. Prigušna i fazna karakteristika jedno-stepenog pojačala u području niskih frekvencija.

čala, i to za područje niskih frekvencija. Primijenimo kod ovog pojačala NR s faktorom β , koji nije ovisan o frekvenciji. Što se pri tome zbiva, najlakše ćemo zaključiti iz vektorskih slika (sl. 104.). Na ovim slikama vektor napona na rešetki označit ćemo sa U_g , vektor izlaznog napona sa U_a , dok će U_r označivati vektor reakcionog napona, a U_u vektor ulaznog napona. Kod jedne od niskih frekvencija bit će napon na rešetki pomaknut prema izlaznom naponu za 25°. To zapravo znači, da se je vektor izlaznog napona kod dotične frekvencije pomaknuo za 25° od svog položaja koji zauzima kod srednjih frekvencija. Pojačanje će kod te frekvencije, kao što slijedi iz dijagrama, biti 0,9-ti dio od pojačanja kod srednjih frekvencija. Ovdje će nam opet biti prikladnije, da izlazni napon držimo konstantnim, a da promjene u pojačanju izražavamo

promjenama napona na rešetki, odnosno promjenama ulaznog napona. Zato ne ćemo u vektorskoj slici kod faznog pomaka od 25° nacrtati vektor U_a smanjen na 0,9-ti dio, već vektor U_g povećan $1/0,9$ puta. Povećanjem vektora U_g poveća se i vektor U_u , što znači, da se je ne samo smanjilo pojačanje samog pojačala, nego i pojačala u NR.



Sl. 104. Vektorski dijagrami napona kod jednostepenog pojačala u NR, i to uz različite fazne zakrete napona rešetke prema izlaznom naponu.

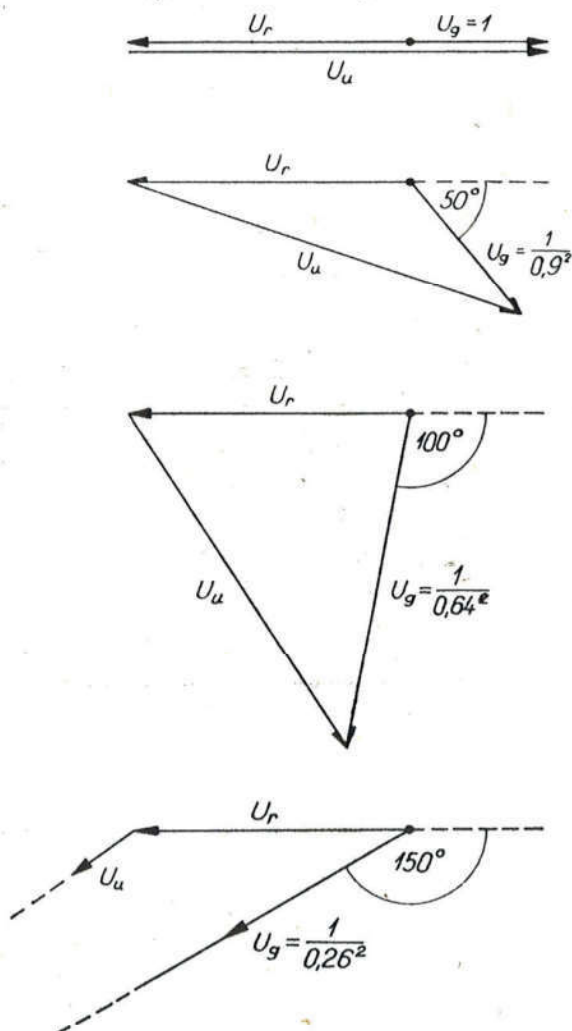
Kod dva puta većeg faznog pomaka, dakle kod pomaka od 50° pojačanje pojačala je 0,64-ti dio od pojačanja kod srednjih frekvencija. Prema tome će vektor U_g imati dužinu $1/0,64$ puta veću od dužine, koju ima bez faznog

pomaka. Kod tri puta većeg faznog pomaka, to jest kod pomaka od 75° , relativno pojačanje je još manje, i iznosi 0,26 odnosno vektor napona na rešetki i vektor ulaznog napona je još duži, i to $1/0,26$ puta. Iz vektorskih slika se vidi, da s porastom vektora U_g raste (doduše, polaganije) i vektor ulaznog napona U_u . Iz toga slijedi, da pojačanje pojačala u NR također pada, ali polaganije nego bez NR.

2. Negativna reakcija preko dva stupnja pojačala može povećati prigušno izobličenje. — Ono, što je gore rečeno za jednostepeno pojačalo, nije za nas ništa novo. Već otprije znamo, da NR smanjuje prigušno izobličenje. No ovo pravilo ne vrijedi općenito, bez ikakvih ograničenja. Ne vrijedi općenito već kod dvostepenog otpornog pojačala. Na temelju gornjeg razlaganja ne će nam biti teško razumjeti, zašto dolazi do odstupanja.

Ako jedan od CR-elemenata uzrokuje kod stanovite frekvencije fazni pomak od 25° i smanjuje pojačanje na 0,9-ti dio, onda će kod dvostepenog pojačala, gdje djeluju dva takva elementa, doći kod iste frekvencije do faznog pomaka od $2 \times 25^\circ$, dakle 50° , i do smanjenja pojačanja od $0,9 \times 0,9$, dakle $0,9^2$ puta. Zato ćemo vektor napona na rešetki U_g sada crtati pod kutom od 50° prema vektoru izlaznog napona U_a , a dužina vektora U_g bit će $1/0,9^2$ puta veća od istog vektora, kad nema faznog pomaka (sl. 105.). Kod one frekvencije, kod koje je fazni pomak u jednom stupnju pojačala iznosio 50° , a pojačanje je bilo 0,64-ti dio najvećeg pojačanja, iznositi će kod dvostepenog pojačala fazni kut $2 \times 50^\circ = 100^\circ$, a odgovarajuće pojačanje će biti $0,64 \times 0,64 = 0,64^2$. Vektor U_g će, dakle, biti $1/0,64^2$ puta duži.

Isto ovako će biti i kod one frekvencije, kod koje je fazni kut u jednom stupnju pojačala iznosio 75° , a pojačanje 0,26-ti dio od najvećeg pojačanja. Kod dvostepenog pojačala fazni kut će biti $2 \times 75^\circ = 150^\circ$, a odgovarajuće relativno pojačanje $0,26 \times 0,26 = (0,26^2)$ puta duži. Pojačanje kod dvostepenog pojačala opada prema nižim frekvencijama mnogo brže, nego kod jednostepenog (kod jednog stupnja imali smo relativna pojačanja $1 - 0,9 - 0,64 - 0,26$, a kod dva stupnja imamo $1 - 0,9^2 - 0,64^2 - 0,26^2$). No to je pojačanje od rešetke prve elektronke do izlaza. A što je s pojačanjem, kad se primijeni NR? Na to pitanje dat će nam odgovor vektor ulaznog napona U_u na sl. 105. Suprotno slučaju kod jedno-

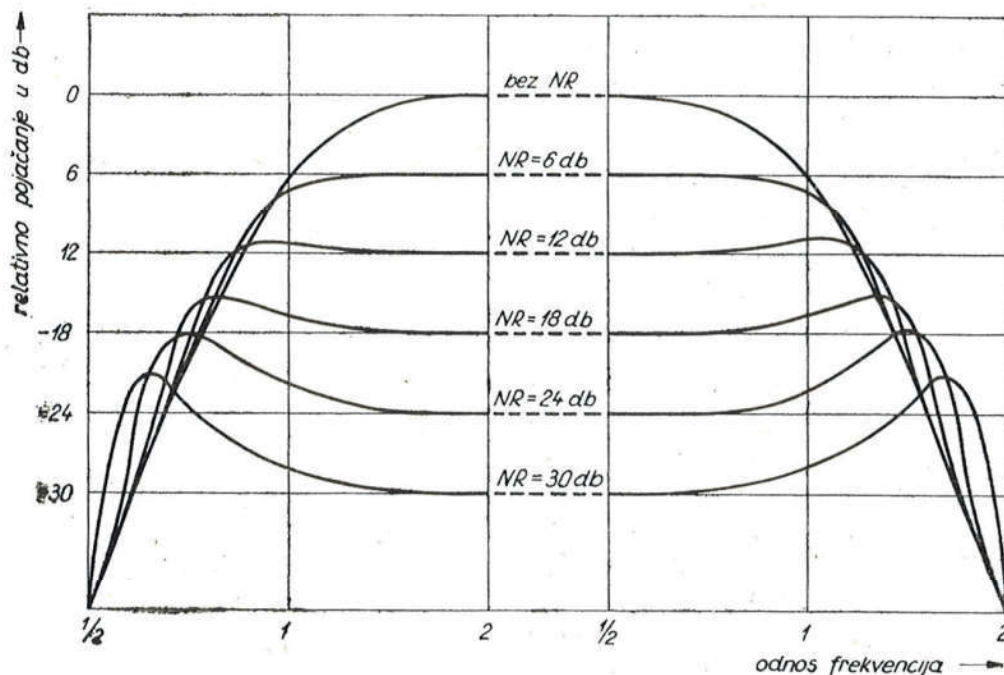


Sl. 105. Vektorski dijagrami napona kod dvostepenog pojačala u NR.

stepenog pojačala postaje ovaj vektor s povećanjem faznog pomaka kraći, što znači, da pojačanje pojačala u NR raste. Tek kod vrlo velikih faznih pomaka postaje vektor U_u veći od svoje početne dužine, što znači, da je tek kod tih frekvencija pojačanje manje od pojačanja kod srednjih frekvencija. Eto, do čega dovodi fazno izobličenje kod dvostepenog pojačala: nastaje izdizanje napona u jednom pojasu najnižih frekvencija dolazi do prigušnog izobličenja, kojeg u pojačalu bez NR nema.

Sve ovo što vrijedi za područje najnižih frekvencija, vrijedi u principu i za područje najviših frekvencija. Kao što smo vidjeli u poglavlju 3., zbog parazitnih kapaciteta dolazi kod pojačala do posve istog faznog pomaka, kao i u području niskih frekvencija, samo što se radi o pomaku suprotnog predznaka. Zato će i za najviše frekvencije vrijediti isti zaključci, koji vrijede i za najniže, to jest naponska karakteristika će se na jednom pojasu izdizati.

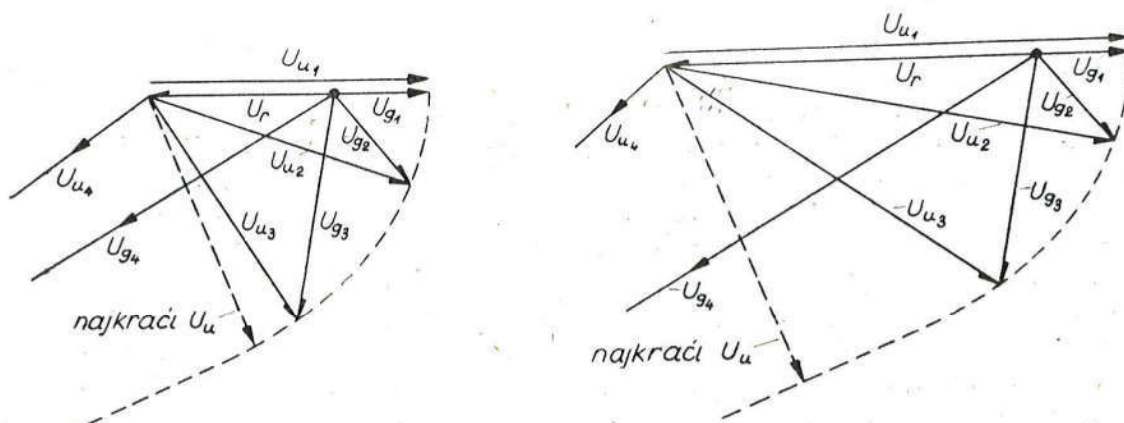
No do izdizanja napona bočnih pojaseva ne mora doći u svakom slučaju, kad se primijeni NR. Hoće li doći do izdizanja, i u kojoj mjeri, ovisi o veličini NR. Kod slabe NR izdizanja nema, već dolazi samo do proširenja frekventnog pojasa. Pojačavanjem NR pojas se sve više širi, dok se naposljetku krajevi karakteristike ne počnu izdizati. Kao što vidimo na sl. 106., izdizanje



Sl. 106. Kod višestepenih pojačala dolazi sa pojačavanjem NR do sve većeg izdizanja napona ekstremnih frekvencija, nastaju »rogovi« na karakteristici.

je to veće, što je NR jača. Istodobno s povećanjem izdizanja vrhovi se sve više jedan od drugoga udaljuju. Zašto dolazi do sve većeg izdizanja, vidi se iz vektorskog dijagrama na sl. 107. Što je vektor U_r duži (NR jača), to je razlika u dužini između vektora U_u kod srednjih frekvencija i najkraćeg vektora U_u veća, što znači, da je razlika u pojačanju kod dotičnih frekvencija veća.

3. Izlazni transformator djeluje kao jedan stupanj pojačala. — Izlazni transformator oslabljuje napon i zakreće fazu na isti način, kao jedan stupanj otpornog pojačala. Prema tome će, na primjer, izlazna elektronka zajedno s izlaznim transformatorom u petlji NR moći imati istu naponsku karakteristiku s izdignutim bočnim pojasevima, kakvu ima dvostepeno otporno pojačalo.



Sl. 107. Vektorski dijagrami s istim naponom na rešetki U_{g1} , a različitim reakcionim naponom U_r . Uz veći U_r (jača NR) veća je razlika između vektora ulaznog napona U_{u1} i najkraćeg vektora ulaznog napona U_u , iz čega slijedi, da je također »rog« na prigušnoj karakteristici veći.

Međustepeni transformator zakreće fazu u području visokih frekvencija za 180° , pa se normalno ne uključuje u petlju NR. Ukoliko se opterećivanjem sekundara dovoljno malenim otporom rezonantna pojava priguši, ponaša se ovaj transformator kao izlazni transformator, te vrijedi isto, što je gore rečeno za ovaj transformator. Isto vrijedi i za paralelno napajani ulazni transformator.

4. Kod pojačala s više od dva stupnja može doći do oscilacija. — Kod otpornog pojačala s tri jednaka stupnja dolazi kod stanovite visoke frekvencije do zaokreta faze od 60° po stupnju, što u sva tri stupnja zajedno daje 180° , čime je ispunjen prvi uvjet za nastajanje oscilacija. Izračunat ćemo, koliki mora biti faktor reakcije βA , pa da bude ispunjen i drugi uvjet. Kod faznog pomaka od 60° u svakom stupnju padne pojačanje po stupnju na 0,5-ti dio onog pojačanja, koje pojačalo ima kad nema faznog pomaka. Prema tome ukupno pojačanje pojačala kod dotične frekvencije iznosi $0,5^3 \cdot A = 0,125 A$, gdje je A ukupno pojačanje kod srednjih frekvencija. Ova vrijednost, to jest $0,125 A$, u isti čas je izlazni napon, koji se dobiva uz napon od 1 volta na rešetki prve elektronke. Da bi nastale oscilacije, mora reakcioni napon, a to je u ovom slučaju $\beta \cdot 0,125 A$ volta, biti jednak jedinici, ili veći od jedinice. Iz toga odnosa dobivamo, da kod trostepenog RC-pojačala s jednakim stupnjevima faktor reakcije βA mora biti manji od 8, jer inače nastaju oscilacije.

Kod četverostepenog RC-pojačala s jednakim stupnjevima reakcioni napon je u fazi s naponom na rešetki prve elektronke već kod faznog zakreta od 45° po stupnju pojačala ($4 \times 45^\circ = 180^\circ$). Pojačanje kod dotične frekvencije padne u svakom stupnju na 0,7-ti dio, odnosno ukupno pojačanje na $0,7^4 = 0,24$ -ti dio od ukupnog pojačanja kod srednjih frekvencija. Prema tome reakcioni napon ovdje iznosi $\beta \cdot 0,24 A$ volta. Uvjet za nastajanje oscilacija

traži, da se ova vrijednost izjednači s jedinicom, iz čega izlazi, da maksimalni faktor reakcije βA kod četverostepenog RC- pojačala smije biti blizu 4.

Normalno se sa NR ne ide preko više od tri stupnja pojačala. Treba naglasiti, da *do pojave vrhova dolazi samo onda, ako su naponske karakteristike pojedinih stupnjeva jednake ili približno jednake*. U gornjim razmatranjima pretpostavljali smo, da osim međustepenih RC-elemenata nema drugih zakretača faze, da se, dakle, radi o triodnim stupnjevima bez katodnih impedancija.

5. Bočni vrhovi mogu biti uzrokom harmoničkog izobličenja i izobličenja transmodulacije. — Moglo bi se pomisliti, da upravo međusobno udaljšivanje vrhova na naponskoj karakteristici, što se dobiva primjenom jače NR, dobro dolazi, jer se na taj način, razmicanjem vrhova, mogu suviše istaknute frekvencije potisnuti u područja ispod i iznad čujnih frekvencija, i time učiniti neškodljivima. No takav zaključak nije ispravan. Na primjer, mehaničko potresanje, koje dolazi od gramofonskog motora, ima frekvencije ispod čujnog područja. Ove se frekvencije preko zvučnice prenose u pojačalo. Budući da se radi o relativno velikim amplitudama, to frekvencije potresanja mogu u pojačalu djelovati štetno, iako nisu čujne. Može se, naime, dogoditi, da naponi ovih frekvencija pomiču radnu točku elektronke u svom ritmu čak u područje zakrivljenosti radne karakteristike. Kako su tonske frekvencije ovim infra-zvučnim frekvencijama superponirane, dolazi tada do harmoničkog izobličenja i izobličenja transmodulacije. Dakako, da će opasnost od izobličenja biti to veća, što je pojačanje napona tih najnižih frekvencija veće, kao što je to slučaj kod pojačala, koje ima na naponskoj karakteristici visoke bočne vrhove nastale primjenom jake NR.

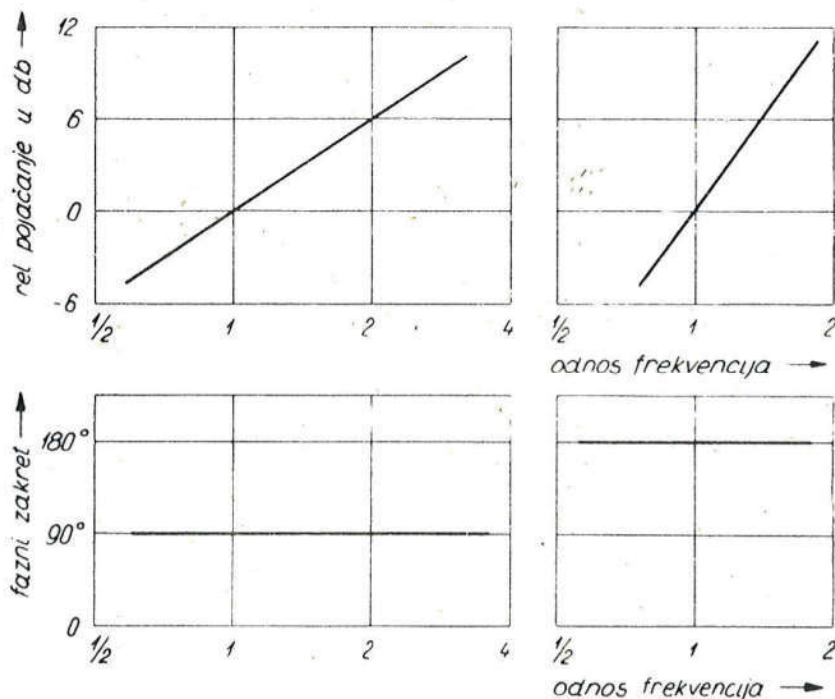
4. Idelna naponska karakteristika pojačala s obzirom na negativnu reakciju

1. Ovisnost oblika fazne karakteristike o obliku naponske karakteristike. — Snimanje naponske karakteristike pojačala je mnogo jednostavnije, nego snimanje fazne karakteristike. Zato je vrlo korisno poznavati način, kako se iz oblika naponske karakteristike može naći — ili barem ocijeniti — kakav oblik ima fazna karakteristika. Navest ćemo nekoliko tipičnih elementarnih slučajeva, koji će nam dati opći uvid u vezu između naponske i fazne karakteristike.

Najjednostavniji oblik naponske karakteristike je horizontala. U tom slučaju je pojačanje za sve frekvencije isto, a fazni kut je kod svih frekvencija jednak nuli.

Drugi po jednostavnosti je slučaj, kada pojačanje jednoliko raste sa frekvencijom. Naponska karakteristika ima tada oblik pravca nagnutog pod stanovitim kutom prema horizontalnoj osi (sl. 108.). Fazni pomak je u ovom slučaju konstantan za sve frekvencije i ovisan o nagibu pravca. Nagib od 6 decibela po oktavi vezan je, kao što smo već vidjeli, uz fazni pomak od 90° , nagib od 12 decibela po oktavi uz 180° , i t. d., to jest za svako povećanje nagiba od 6 decibela po oktavi fazni pomak se povećava za 90° . Ako je pravac pojačanja nagnut na suprotnu stranu, onda i fazni kut mijenja predznak.

Nagib pravca na desno naznačuje, da izlazni napon pojačala prethodi ulaznom naponu (fazni kut je pozitivan), a nagib pravca na lijevo naznačuje, da izlazni napon zaostaje za ulaznim naponom (fazni kut je negativan).



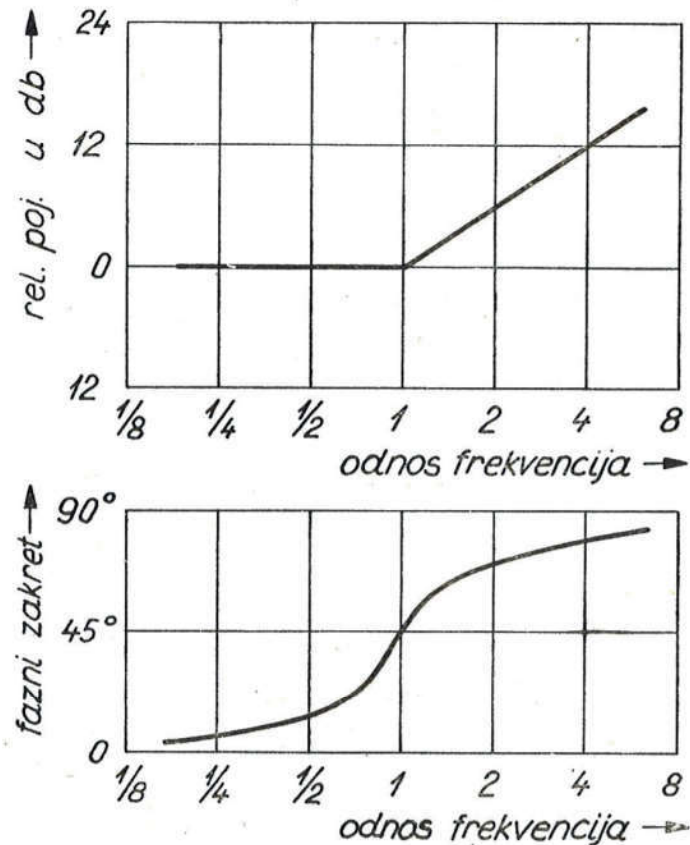
Sl. 108. Uz konstantan nagib prigušne karakteristike također fazni zakret je konstantan. Većem nagibu odgovara veći fazni zakret.

Na sl. 109. prikazana je naponska karakteristika, koja je sastavljena od obiju prije spomenutih: lijevi dio karakteristike je horizontala, a desni nagnuti pravac. Također fazna karakteristika bit će sastavljena. Iz horizontale, koja leži na frekventnoj osi, prelazi fazna karakteristika postepeno u horizontalu, koja pripada nagnutom pravcu. Ako je pravac nagnut prema dolje onda i fazna karakteristika mijenja smjer svog nagiba (sl. 110.), jer promjena smjera nagiba naponske karakteristike povlači za sobom promjenu predznaka faznog kuta.

Od horizontale i kosog pravca možemo sastaviti naponsku karakteristiku, koja je još složenija, kao, na primjer, ona na sl. 111. U ovom slučaju fazna karakteristika počinje negdje daleko na lijevoj strani odvajajući se postepeno od nulte vrijednosti, ispod sredine kosog pravca fazni kut postiže najveću vrijednost, a zatim se daleko na desnoj strani opet postepeno približava nuli.

Fazni kut kod neke frekvencije ovisi o nagibu naponske karakteristike kod te frekvencije. No, kao što se može razabrati iz gornjih primjera, fazni kut ne ovisi samo o obliku naponske karakteristike u okolini dotične frekvencije, nego i o njezinom obliku kod udaljenijih susjednih frekvencija. Frekvencije, koje su udaljene više od jedne oktave od dotične frekvencije, bilo naniže, bilo naviše, imaju malen utjecaj na fazni pomak, i utoliko manji, što su udaljenije.

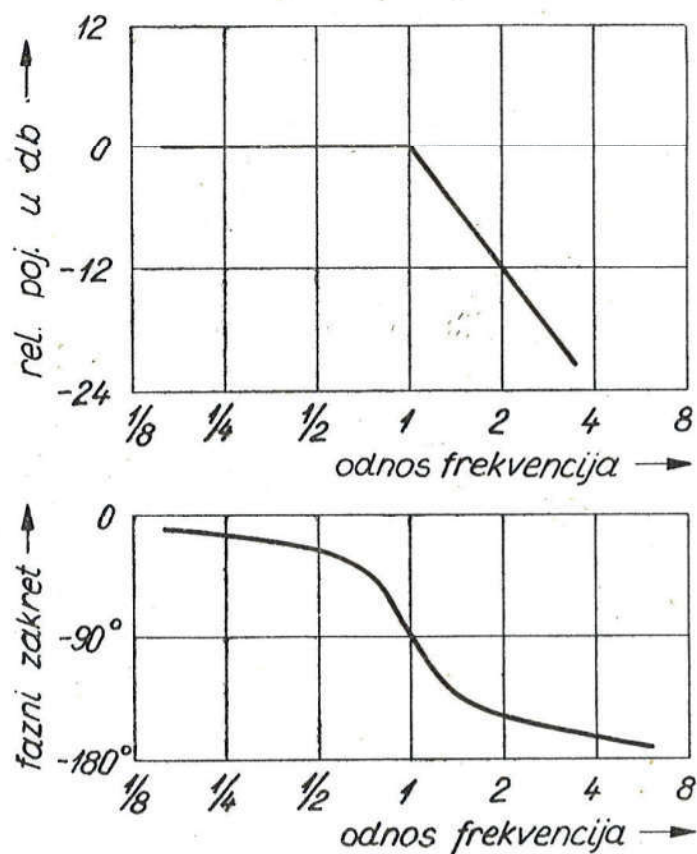
Stvarne naponske karakteristike ne mogu imati onako oštre prelaze, kao što smo ih u ovom odsjeku crtali na idealiziranim karakteristikama. Iako su ovi prelazi na stvarnim karakteristikama zaobljeni, to ne utječe bitno na oblik faznih karakteristika. Tako, na primjer, naponska karakteristika na sl. 111. i one na sl. 99. imaju posve slične fazne karakteristike.



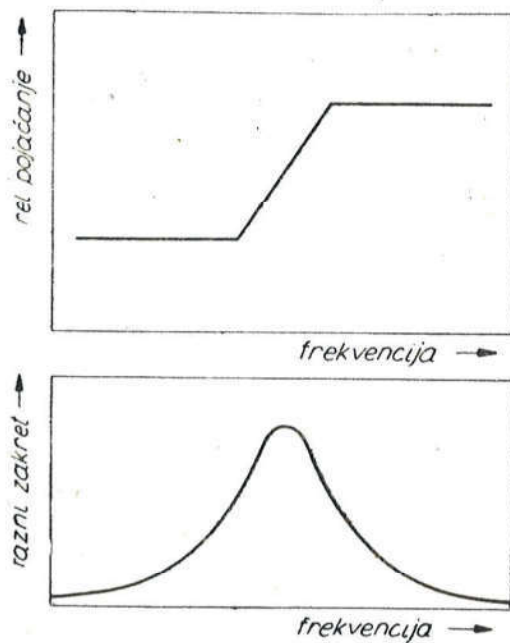
Sl. 109. Prigušna karakteristika sastavljena od horizontale i nadesno nagnutog pravca ima faznu karakteristiku u obliku istegnutog nagnutog slova S.

Čvrsta veza, koja postoji između naponske i fazne karakteristike, omogućuje, da se ne vodi posebno računa o faznoj karakteristici, jer oblik naponske karakteristike daje uvid i u fazne odnose. Pri tome treba naročito naglasiti, da *ovakva ovisnost između naponske i fazne karakteristike postoji samo kod sklopova s takozvanim minimalnim faznim pomakom*. Ona ne postoji kod sastavnih dijelova, koji imaju raspodijeljene električke konstante, kao što je to slučaj, na primjer, kod vodova, kod kojih je otpor, induktivitet i kapacitet raspodijeljen jednoliko po cijeloj dužini.

2. Naponska karakteristika i stupanj negativne reakcije. — Uvid u prilike u pojačalu u vezi sa NR daje frekventna karakteristika reakcionog napona i njegove faze. Ako je djelatelj napona takav, da dijeljenje napona ne ovisi o frekvenciji (β neovisno o frekvenciji), onda se iz frekventne karakteristike izlaznog napona može lako dobiti frekventna karakteristika reakcionog napona. Reakcioni napon je za stanoviti broj decibela niži od izlaznog napona.

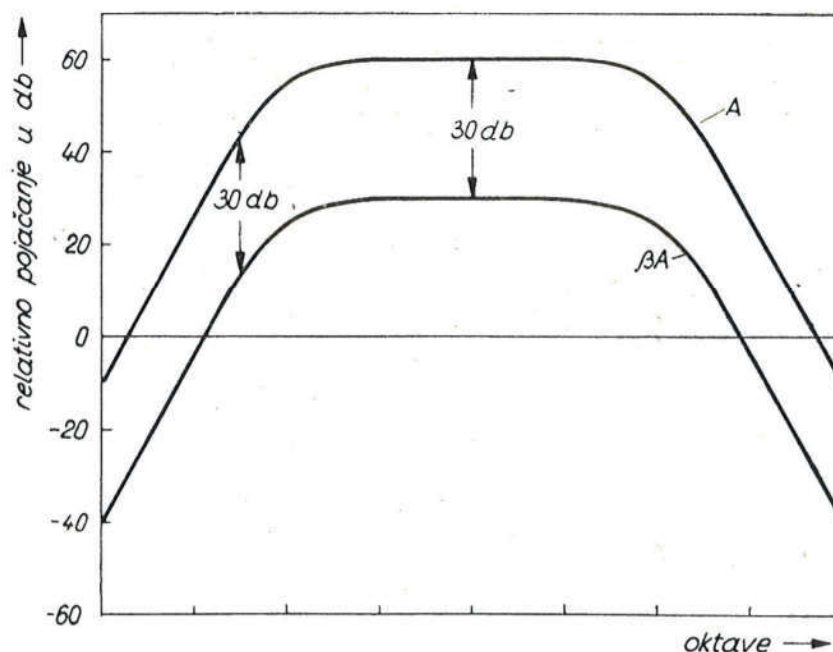


Sl. 110. Kod prigušne karakteristike sastavljene od horizontale i pravca nagnutog nalijevo fazni zakret je negativan, a fazna karakteristika ima oblik istegnutog obrnutog slova S.

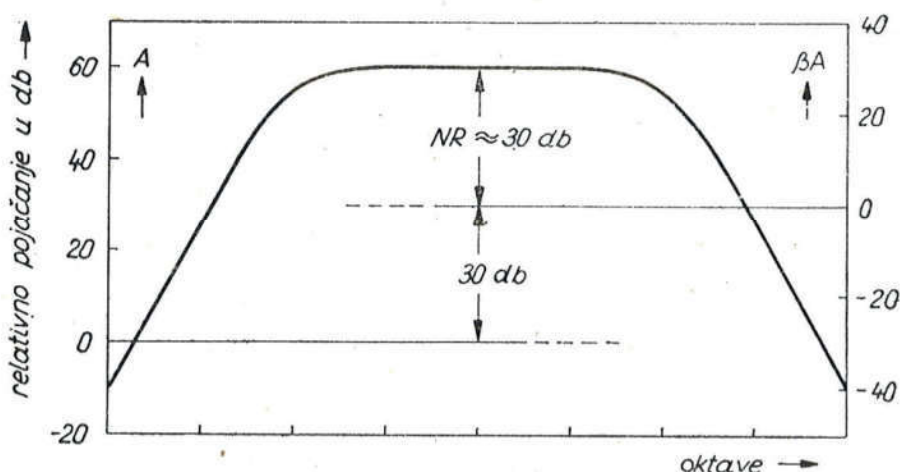


Sl. 111. Kod stepeničaste prigušne karakteristike s usponom nadesno fazni zakret najprije raste, dosiže vršnu vrijednost, a onda pada. Vrh se nalazi ispod sredine nagnutog dijela prigušne karakteristike.

Da bi se dobila frekventna karakteristika reakcionog napona, treba samo prema tome karakteristiku izlaznog napona spustiti vertikalno prema dolje za dotični broj decibela. Na sl. 112. karakteristika reakcionog napona ili βA -karakteristika dobivena je spuštanjem karakteristike izlaznog napona ili A -karakteristike za 30 decibela. Kod svih frekvencija βA -napon je za 30 decibela niži od A -napona¹.



Sl. 112. Spuštanjem prigušne karakteristike izlaznog napona (A) za onoliki broj decibela, za koliko je reakcioni napon niži od izlaznog, dobiva se prigušna karakteristika reakcionog napona (βA).

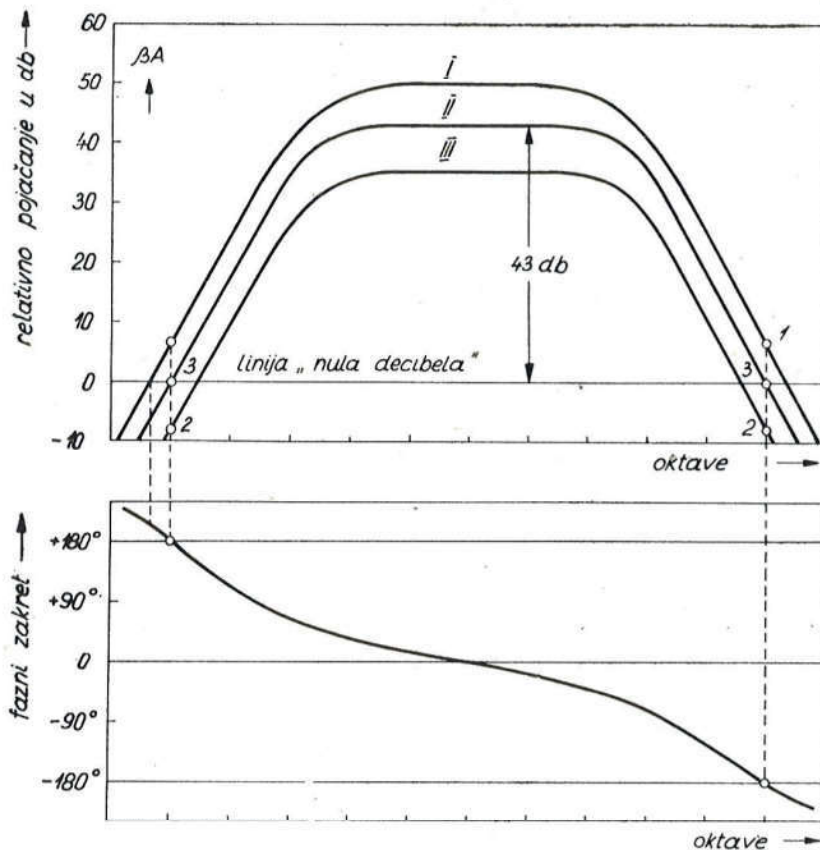


Sl. 113. Prigušna karakteristika reakcionog napona može se iz prigušne karakteristike izlaznog napona dobiti i tako, da se skala decibela pomakne za određeni broj decibela prema gore.

¹ Sjecišta horizontale »nula decibela« s karakteristikama daju one frekvencije, kod kojih je pojačanje jednako 0 decibela ili 1 puta, to jest, kod kojih je izlazni napon, odnosno reakcioni napon, jednak naponu na rešetki ulazne elektronke.

No βA -karakteristika može se iz A -karakteristike dobiti na još jednostavniji način. Umjesto da se A -karakteristika spusti prema horizontali »nula decibela« za određeni broj decibela, jednostavnije je ovu horizontalu podignuti za dotični broj decibela. Ovo je učinjeno na sl. 113. sa skalom na desnoj strani.

Izraz $(1 + \beta A)$ daje napon, koji je, kao što smo vidjeli u glavi drugoj, brojčano jednak smanjenju pojačanja ili stupnju NR. Kod jake NR je βA mnogo veći od 1, tako da samu vrijednost βA možemo smatrati stupnjem NR. Prema tome razmak između horizontale »nula decibela« i horizontalnog dijela βA -karakteristike, izražen u decibelima, daje stupanj NR u području srednjih frekvencija.

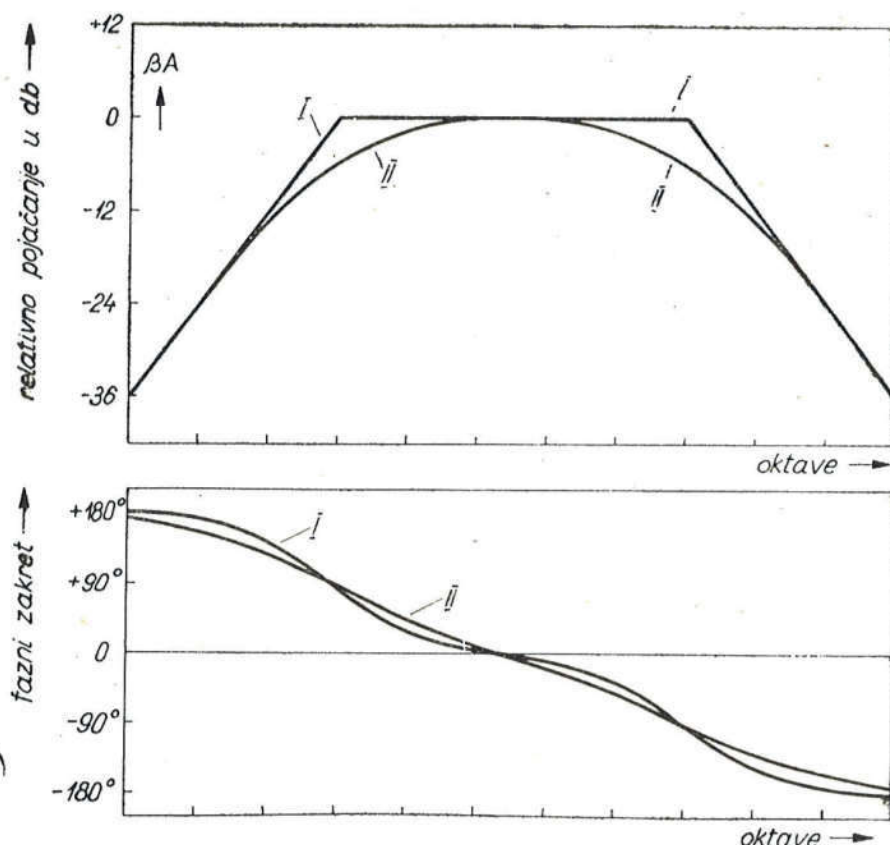


Sl. 114. Iz prigušne i fazne karakteristike moguće je zaključiti, da li se može, i kolika NR se može primijeniti.

Sada još treba ispitati, da li je ovako dobiven stupanj NR moguće primijeniti. Da se to utvrdi, treba poznavati faznu karakteristiku pojačala, odnosno reakcionog napona. Ako do faznog zakreta od 180° dolazi kod frekvencije, kod koje se odgovarajuća točka na βA -karakteristici nalazi iznad linije »nula decibela«, kao na sl. 114, točka 1, onda dotični stupanj NR nije moguće primijeniti, jer je reakcioni napon veći od napona na rešetki. Naprotiv, karakteristika III na sl. 114. prikazuje slučaj, gdje je kod zakreta od 180° reakcioni napon manji od rešetkinog. To se vidi po tome, što se odgovarajuće točke na βA -karakteristici nalaze ispod linije »nula decibela«.

Povuče li se horizontala »nula decibela« kroz one točke βA -karakteristike, kod kojih dolazi do zaokreta faze za 180° , dobiva se NR, koja pojačalo dovodi upravo na prag oscilacija. Na sl. 114. to je kod karakteristike II NR od 43 decibela. Ovo je maksimalna NR, koja se u ovom slučaju teorijski može primijeniti.

3. Idealna frekventna karakteristika reakcionog napona. — Naponska karakteristika pojačala može samo u jednom dijelu frekventnog područja imati horizontalan tok. Prema najnižim i najvišim frekvencijama ona se nužno spušta težeći prema nuli. Isto, dakako, vrijedi i za frekventnu karakteristiku reakcionog napona. U idealnom slučaju ovo spuštanje bilo bi takvog karaktera, da fazni kut ne bi nikada prelazio vrijednost 180° , te ne bi došlo do

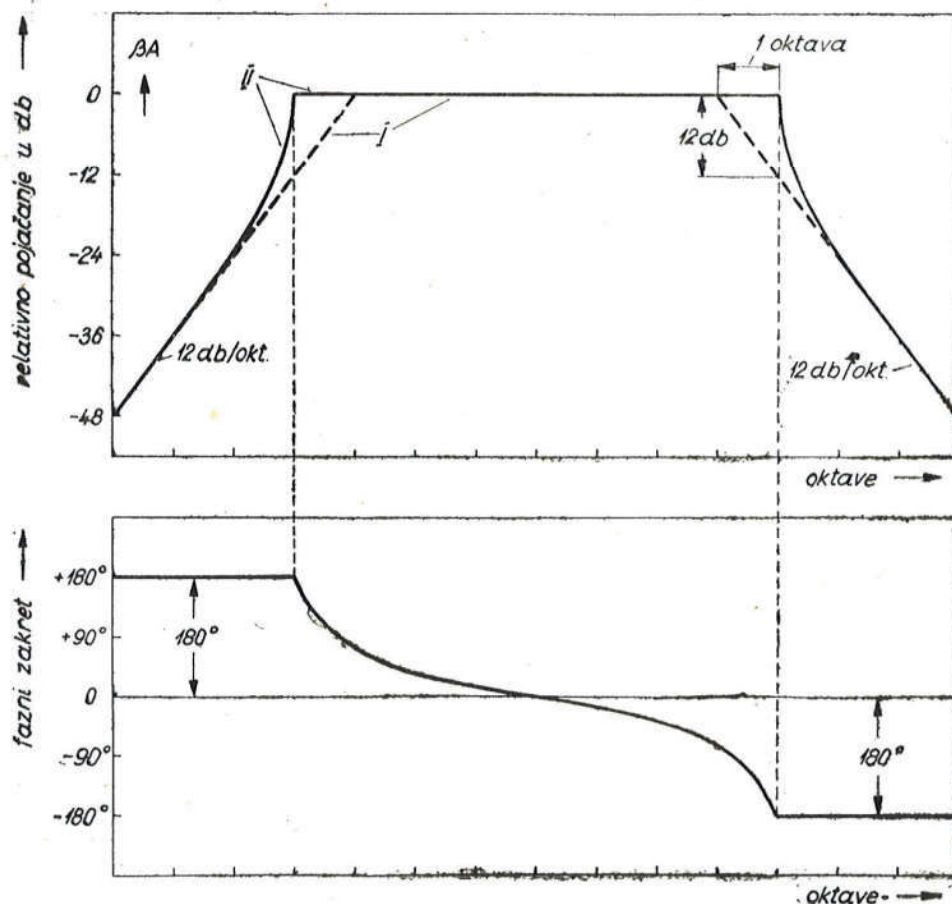


Sl. 115. Prigušna karakteristika I ima širi pojas konstantnog pojačanja (dakle konstantne NR) nego karakteristika II, a da se pri tome fazne karakteristike tek neznatno razlikuju.

oscilacija. Kao što otprije znamo, takva karakteristika je ona, kod koje krajnji nagib iznosi najviše 12 decibela po oktavi. No fazni kut ne prelazi 180° ni kod karakteristike I na sl. 115., ako nagib nije veći od 12 decibela po oktavi. Karakteristiku ovoj oblika imalo bi RC-pojačalo onda, kad pretežni utjecaj spojnog kapaciteta kod niskih frekvencija, odnosno utjecaj parazitnih kapaciteta kod visokih frekvencija, ne bi postojao samo kod ekstremnih frekvencija, nego i u krajnjim područjima najvećeg pojačanja pojačala. Takvu karakteristiku mogli bismo dobiti na taj način, da opadanje pojačanja u području zaobljenja normalne karakteristike pojačala posebnim korektorima sprije-

čimo. Time bismo proširili pojas konstantnog pojačanja, a da faznu karakteristiku ne pogoršamo.

Postoji mogućnost, da se pojas konstantnog pojačanja još više proširi, a da pri tome fazni kut ne prijeđe dopuštenu granicu. Naponsku karakteristiku takvih svojstava vidimo na sl. 116. Ova karakteristika se na krajevima najprije strmo, a kasnije postepeno sve blaže spušta. U području najnižih i najviših frekvencija karakteristika prelazi u pravac. Na istoj slici vidimo i faznu karakteristiku. Kod iste frekvencije, kod koje počinje spuštanje naponske karakteristike, fazni kut postiže maksimalnu vrijednost, i dalje ostaje

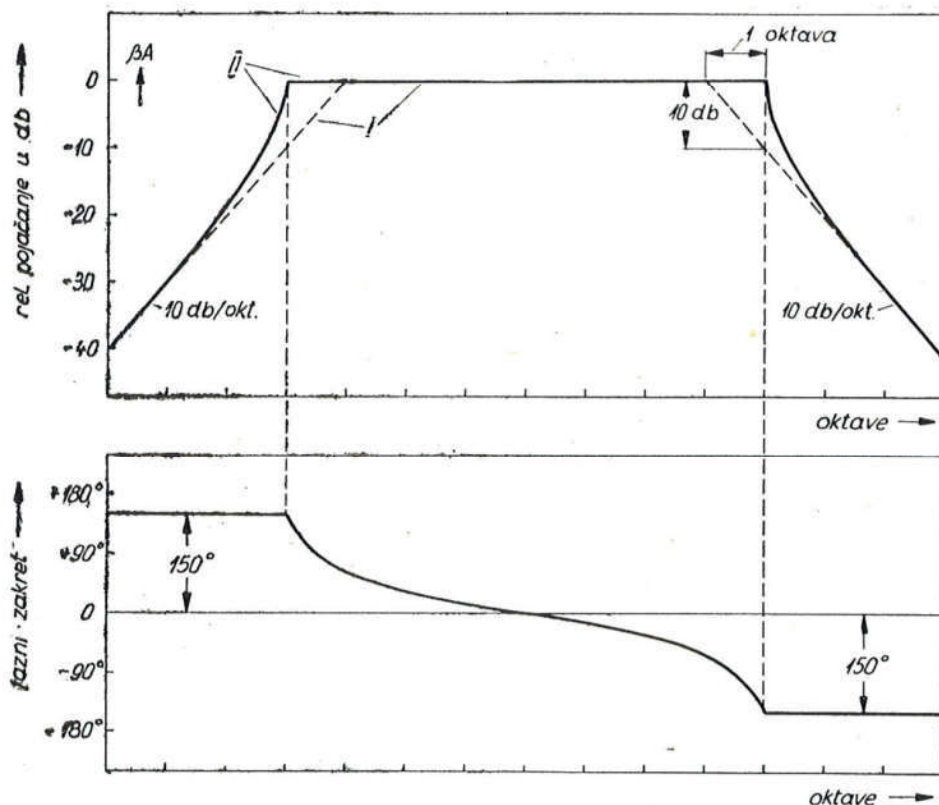


Sl. 116. Idealna prigušna i fazna karakteristika reakcionog napona. Ovdje fazni kut iznosi 180° , te se kod primjene NR pojačalo nalazi na pragu oscilacija.

konstantan. Ova najveća vrijednost faznog kuta ovisi o nagibu naponske karakteristike kod ekstremnih frekvencija. Uz krajnji nagib od 12 decibela po oktavi najveći fazni kut iznosi 180° .

Uspoređujući naponske karakteristike I i II na sl. 116. vidimo, da se krajnje točke horizontalnog dijela karakteristike II nalaze 12 decibela iznad karakteristike konstantnog nagiba. Prema tome karakteristika II pruža prema karakteristici konstantnog nagiba dobitak na širini prenošenog pojasa od jedne oktave kod niskih i jedne oktave kod visokih frekvencija, dakle ukupno dvije oktave.

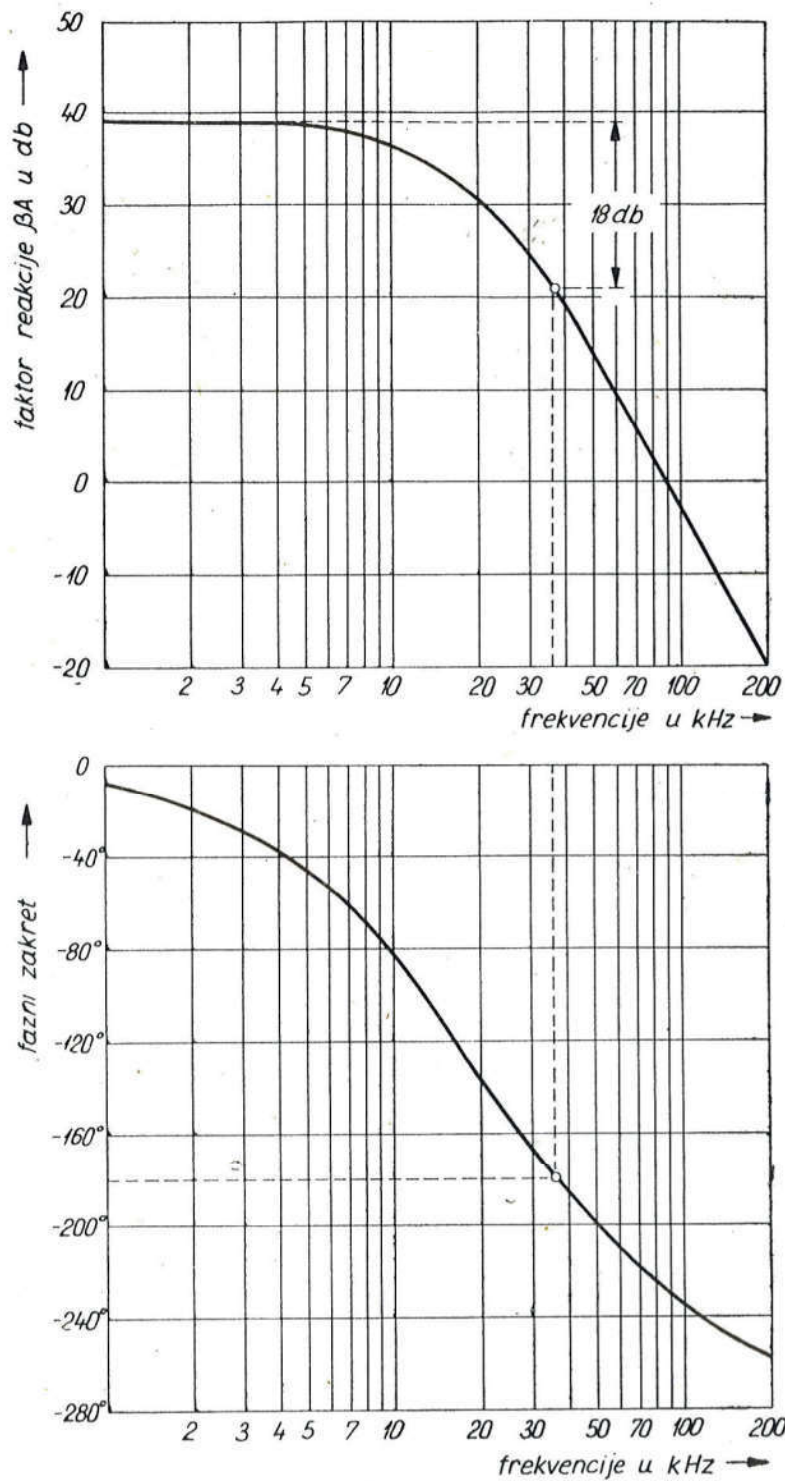
4. Fazno osiguranje. — U području, u kojem je reakcioni napon dovoljno velik, to jest u kojem je βA veće od 1, ne možemo dopustiti, da fazni kut bude upravo 180° , jer bismo time pojačalo doveli na prag oscilacija. Zato naponska karakteristika na sl. 116. mora na svojim krajevima, imati takav oblik, da fazni kut bude manji od 180° . To znači, da mora imati manji nagib. Kako se u praksi ne može postići karakteristika upravo onakvog oblika, kakav ima idealna karakteristika, to nije dovoljno, da nagib idealne karakteristike bude samo tek nešto manji od 12 decibela po oktavi (fazni kut tek nešto manji od 180°). Obično se dobiva dovoljno velika sigurnost, da u praktičkoj izvedbi fazni kut ne će doseći ni prijeći 180° , ako se projektiranje vrši na temelju idealne naponske karakteristike nagiba 10 decibela po oktavi, što



Sl. 117. Idealna prigušna karakteristika s krajnjim nagibom od 10 decibela po oktavi daje fazno osiguranje od 30° .

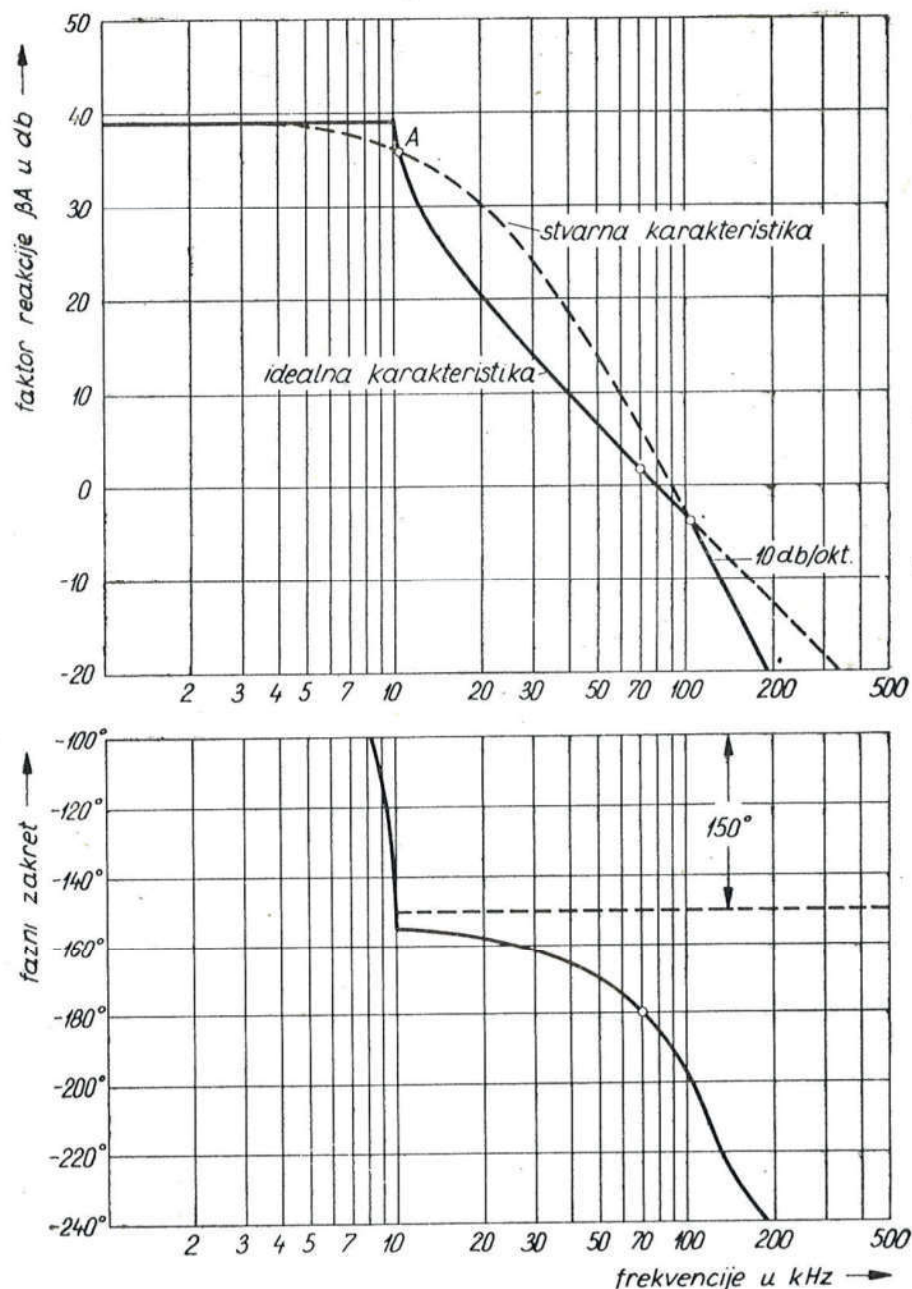
odgovara faznom kutu od 150° (sl. 117.). Svakom decibelu nagiba naponske karakteristike odgovara, naime, 15° faznog kuta.

5. Usklađivanje idealne i stvarne naponske karakteristike pojačala s obzirom na negativnu reakciju. — Na sl. 118. prikazana je frekventna karakteristike reakcionog napona samo za područje visokih frekvencija. To je učinjeno radi jednostavnosti, jer sve ono, što vrijedi u vezi s karakteristikom u području visokih frekvencija, vrijedi za isto takvu (odnosno simetričnu) karakteristiku u području niskih frekvencija. Kao što se vidi iz slike, krajnji nagib karakteristike je 18 decibela po oktavi. Uz ovaj nagib dolazi kod stanovite frekvencije do faznog zaokreta, koji je veći od 180° , kao što to pokazuje i fazna karakteristika na istoj slici. Fazni kut od 180° postiže reakcioni



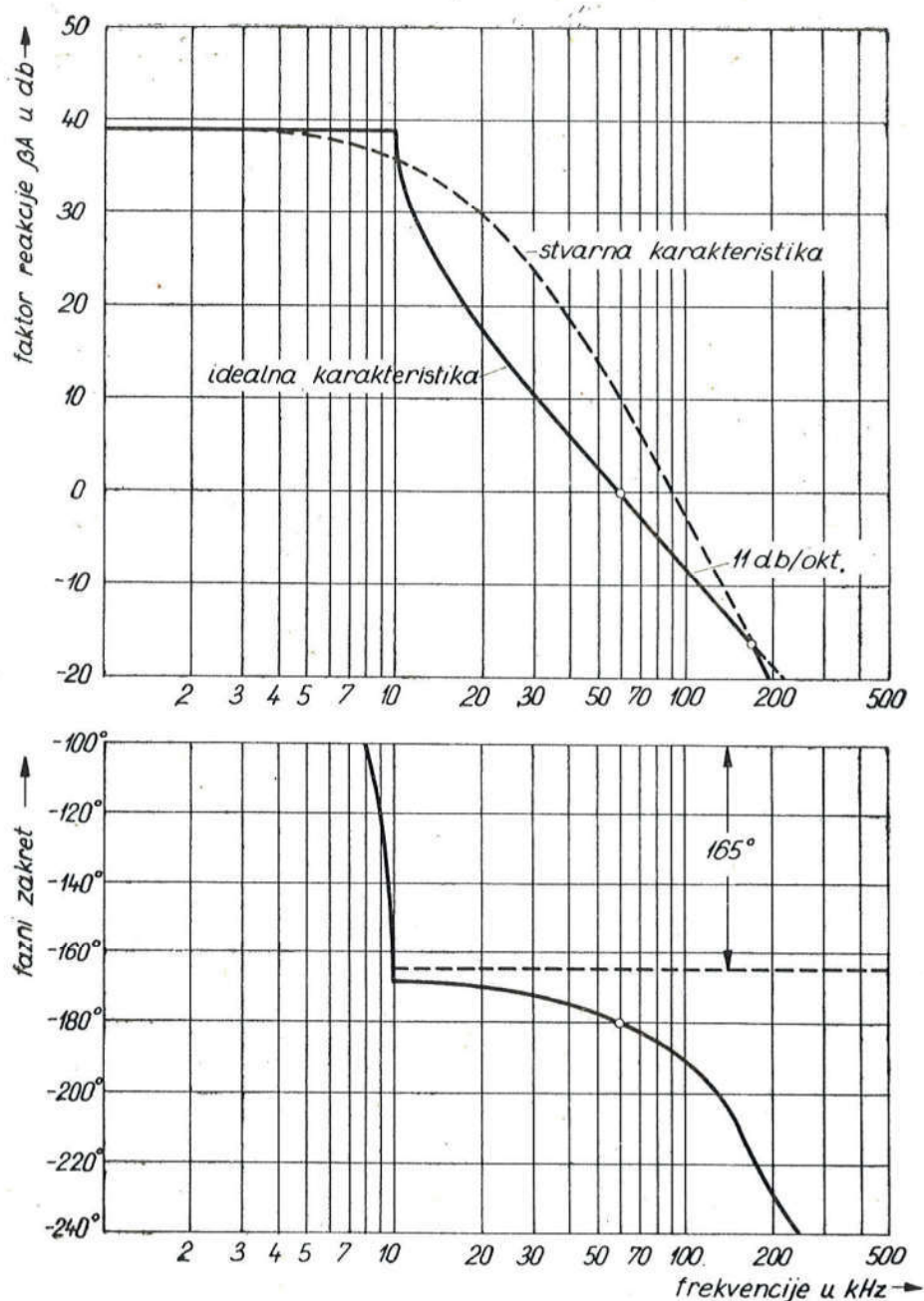
Sl. 118. Prigušna i fazna karakteristika reakcionog napona u području visokih frekvencija, s krajnjim nagibom od 18 decibela po oktavi. Iz dijagrama se vidi, da maksimalna teorijski moguća NR iznosi 18 decibela.

napon kod frekvencije od 36 kHz, iz čega izlazi, da maksimalna NR, koja bi se mogla u ovom slučaju primijeniti, iznosi 18 decibela. Uz ovoliku, naime, NR postaje kod frekvencije od 36 kHz reakcioni napon jednak naponu na rešetki. Kako su ovi naponi istofazni, pojačalo je na pragu oscilacija. Do primjene jače NR može doći samo onda, ako promijenimo frekventnu karakteristiku reakcionog napona. Neka nova karakteristika bude ona s maksimalnim pojasom konstantnog pojačanja (sl. 117.) s krajnjim nagibom od 10 decibela po oktavi. Kao što se vidi iz sl. 119., stvarna karakteristika se u području



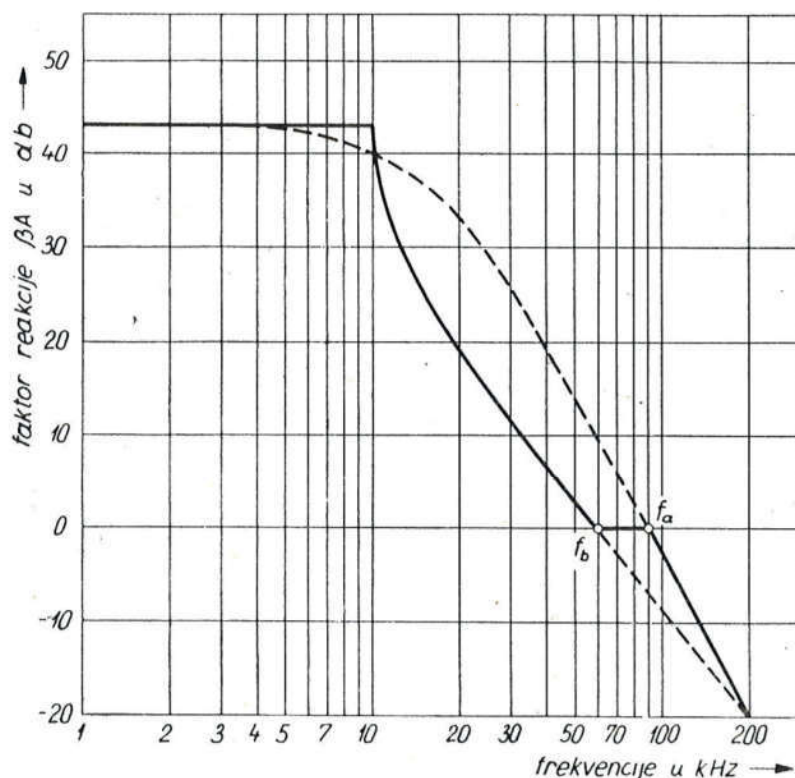
Sl. 119. Kombinacijom idealne i stvarne karakteristike dobiva se lomljena karakteristika. U slučaju, koji prikazuje dijagram, sjecište karakteristika (točka B) nije dovoljno nisko, da bi bilo moguće primijeniti NR od predviđenih 39 decibela. (Točkom B označeno je donje sjecište karakteristika).

između točaka A i B nalazi iznad idealne karakteristike. Obrnuto je kod viših frekvencija desno od točke B. Da bi se stvarna karakteristika između točaka A i B pretvorila u idealnu karakteristiku, treba napone dotičnih frekvencija oslabiti. To se u praksi može izvesti bez većih poteškoća. Naprotiv, u području desno od točke B trebalo bi napone povišiti, pa da se dođe na idealnu karakteristiku. Ovo je već mnogo kompliciranije, i za praksu jedva da dolazi u obzir. Utoliko više, što bi to trebalo učiniti s naponima svih frekvencija desno od točke B do u neizmjeru. No, kad bismo tako nešto mogli čak i na



Sl. 120. Uz veći nagib idealne karakteristike pada sjecište idealne i stvarne karakteristike reakcionog napona niže, što poboljšava faznu karakteristiku i omogućuje predviđenu NR.

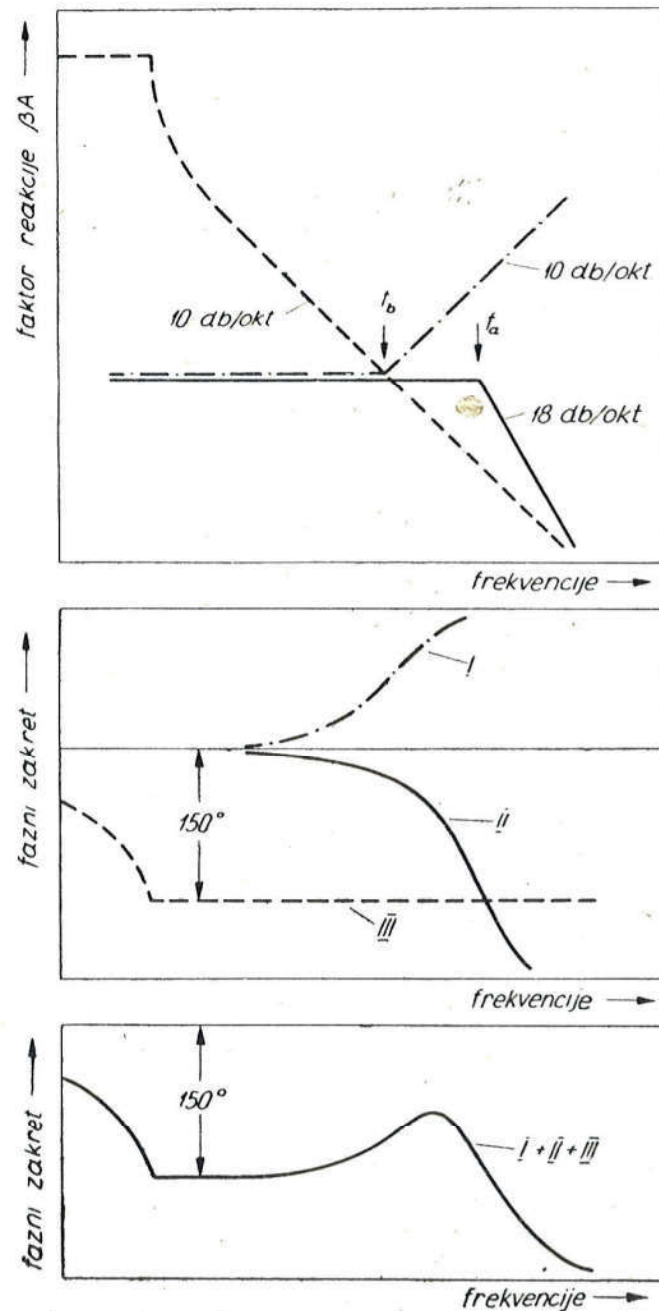
jednostavan način izvesti, ne bismo to činili, jer nije potrebno. Nas, kao što znamo, ne smeta da fazni kut iznosi i više od 180° , ako je pri tome reakcioni napon tako nizak, da ne može doći do oscilacija (βA manje od 1). Prema tome, uzevši sasvim općenito, sjecište idealne i stvarne karakteristike mora se nalaziti ispod horizontale, koja odgovara faktoru reakcije $\beta A = 1$, odnosno, ako je faktor reakcije izražen u decibelima, ispod horizontale »nula decibela«. Pogledajmo na sl. 119., kakve fazne odnose daje ovakva lomljena karakteristika, koja je sastavljena od idealne i stvarne karakteristike. Idealna karakteristika siječe horizontalnu »nula decibela« kod frekvencije od 80 kHz. Kod te frekvencije ne bismo smjeli imati fazni kut od 180° ili veći od ovoga. No iz fazne



Sl. 121. Ovakva stepeničasta karakteristika reakcionog napona ima povoljnu faznu karakteristiku.

karakteristike se vidi, da fazni kut dosiže 180° već kod 70 kHz. Znači, da bismo uz ovoliku NR (39 db) nužno imali samooscilacije. Postoji mogućnost, da se u ovom slučaju primijeni upravo ovolika NR, a da oscilacija ipak ne bude. To se može postići tako, da se nagib idealne karakteristike poveća na 11 decibela po oktavi, što odgovara faznom kutu od 165° (sl. 120.). Sjecište idealne i stvarne karakteristike time padne niže, a također se sjecište karakteristike s horizontalom »nula decibela« pomakne na nižu frekvenciju, u našem slučaju na 60 kHz. Iz fazne karakteristike se vidi, da se fazni kut od 180° dobiva upravo kod frekvencije od 60 kHz, dakle kod frekvencije, kod koje reakcioni napon postane jednak naponu na rešetki, te je pojačalo tek na pragu oscilacija.

6. Maksimalna negativna reakcija. — Iz izlaganja u prethodnom odsjeku vidi se, kako je kod kombinirane karakteristike na sl. 120. zbog velikog krajnjeg nagiba stupanj NR ograničen. Iz ove karakteristike se ne



Sl. 122. Stepeničastu karakteristiku možemo smatrati kombinacijom triju karakteristika određenog oblika (gornja slika). Svaka od ove tri karakteristike ima svoju faznu karakteristiku (slika u sredini). Sve tri fazne karakteristike zbrojene zajedno daju jednu faznu karakteristiku (donja slika). Ovo je fazna karakteristika stepeničaste karakteristike reakcionog napona.

može vidjeti, koji se stupanj NR ovdje daje primijeniti. To otkriva tek fazna karakteristika. Sama fazna karakteristika nije povoljna, jer kod frekvencija nižih od one, kod koje dolazi do prelaza preko 180° , fazno osiguranje nije jednoliko.

No postoji naponska karakteristika, koja ima takav oblik, da se može lako odrediti, kolika se maksimalna NR može postići uz stanoviti krajnji nagib karakteristike, i uz određenu širinu pojasa, u kojem treba da je NR konstantna. Kod takve karakteristike je fazno osiguranje u širokom pojasu frekvencija praktički konstantno. Ovakvu karakteristiku vidimo na sl. 121.

Kod ove kombinirane karakteristike spojena je idealna karakteristika sa stvarnom karakteristikom pomoću jedne horizontale. Krajnje frekvencije na horizontali moraju biti u stanovitom međusobnom odnosu, koji ovisi o odnosu nagiba idealne i stvarne karakteristike. Do tog odnosa doći ćemo na temelju slijedećeg razmatranja:

Našu novu karakteristiku možemo smatrati sastavljenom od ove tri karakteristike (sl. 122.): od idealne karakteristike s krajnjim nagibom od 10 decibela po oktavi, zatim od karakteristike, kakvu smo imali na sl. 109., također nagiba od 10 decibela po oktavi, i s koljenom kod frekvencije f_b , i konačno od karakteristike istig tipa, kao i ova prethodna, ali s koljenom kod frekvencije f_a i s nagibom, koji ima stvarna karakteristika pojačala. Ove posljednje dvije karakteristike imaju nagibe suprotnog predznaka, te će i fazni kutovi, koji njima pripadaju, biti po predznaku suprotni. Lijevo od početka nagiba, dakle, kod nižih frekvencija, fazni kut ovih karakteristika je približno proporcionalan frekvenciji. To znači, da je fazni kut kod neke frekvencije, koja je, na primjer, tri puta niža od frekvencije, kod koje počinje nagib pravca, također tri puta manji od faznog kuta kod početka nagiba. Prema tome možemo reći i ovako: fazni kut je proporcionalan odnosu dotične frekvencije prema frekvenciji, kod koje počinje nagib pravca. Osim toga fazni kut je proporcionalan i nagibu karakteristike. Nagib idealne karakteristike označit ćemo sa k_1 , a stvarne sa k_2 . Iz gornjega slijedi, da će fazni kutovi kod neke frekvencije f_1 biti:

$$\varphi_1 = k_1 \frac{f_1}{f_b} \quad \text{i} \quad \varphi_2 = k_2 \frac{f_1}{f_a} \quad (59)$$

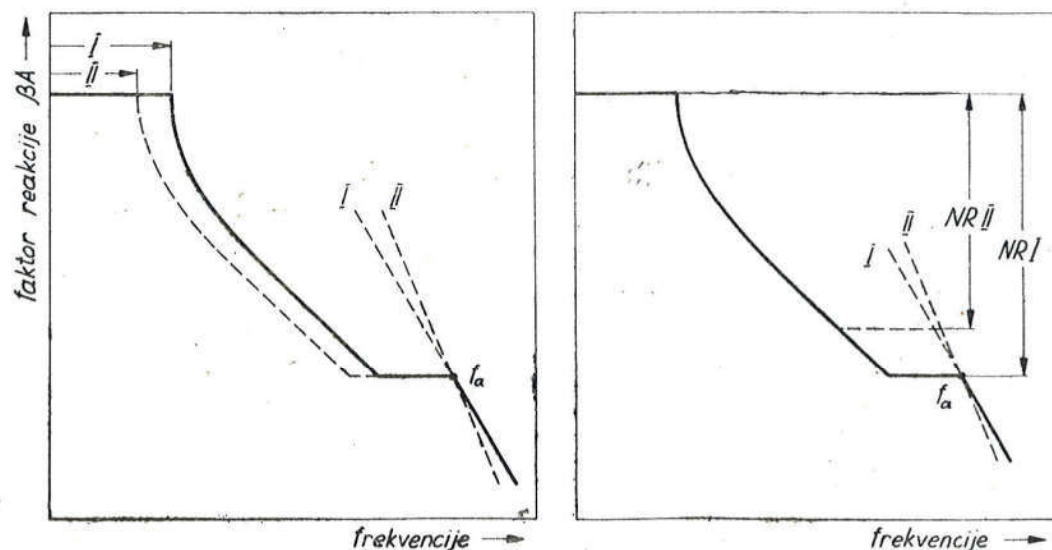
Kad su ovi kutovi jednaki, oni se, budući da su suprotnog predznaka, poništavaju. To se događa onda, kada između frekvencija f_a i f_b i nagiba — kao što to slijedi iz jednadžbi (59) — postoji ovaj odnos:

$$\frac{f_a}{f_b} = \frac{k_2}{k_1} = \frac{\text{nagib stvarne karakteristike}}{\text{nagib idealne karakteristike}} \quad (60)$$

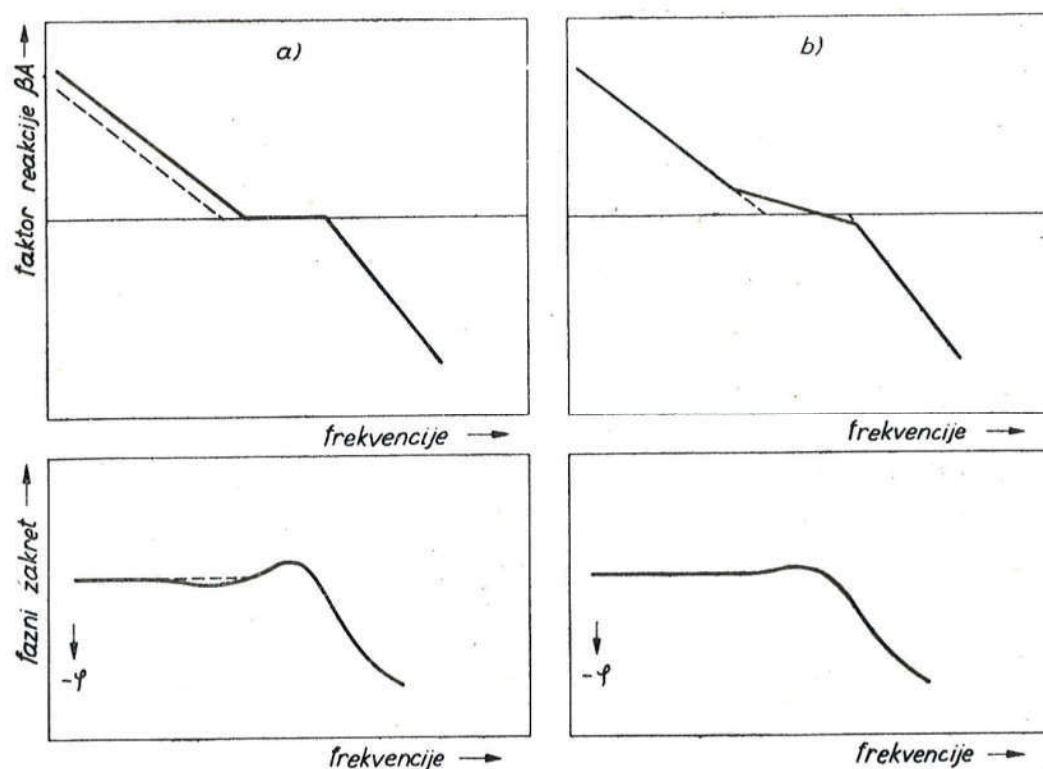
Fazna karakteristika, koja pripada ovakvoj stepeničastoj naponskoj karakteristici, prikazana je na sl. 122. Ova karakteristika mnogo je povoljnija od one na sl. 120. U području najvećeg faznog kuta karakteristika je ispočetka horizontalna, a kasnije se kut čak smanjuje, i tek kod posve visokih frekvencija prelazi preko 180° .

Iz jednadžbe (60) se vidi, da je horizontalni dio naponske karakteristike to duži, što je nagib stvarne karakteristike k_2 veći. To znači, da veći nagib k_2

uz danu frekvenciju f_a (koju određuje presjecište »nula decibela« sa stvarnom karakteristikom), sužava pojas konstantne NR. Ili također: uz danu širinu pojasa, u kojem treba da je NR konstantna, i uz danu frekvenciju f_a , veći nagib k_2 smanjuje stupanj NR (sl. 123.).



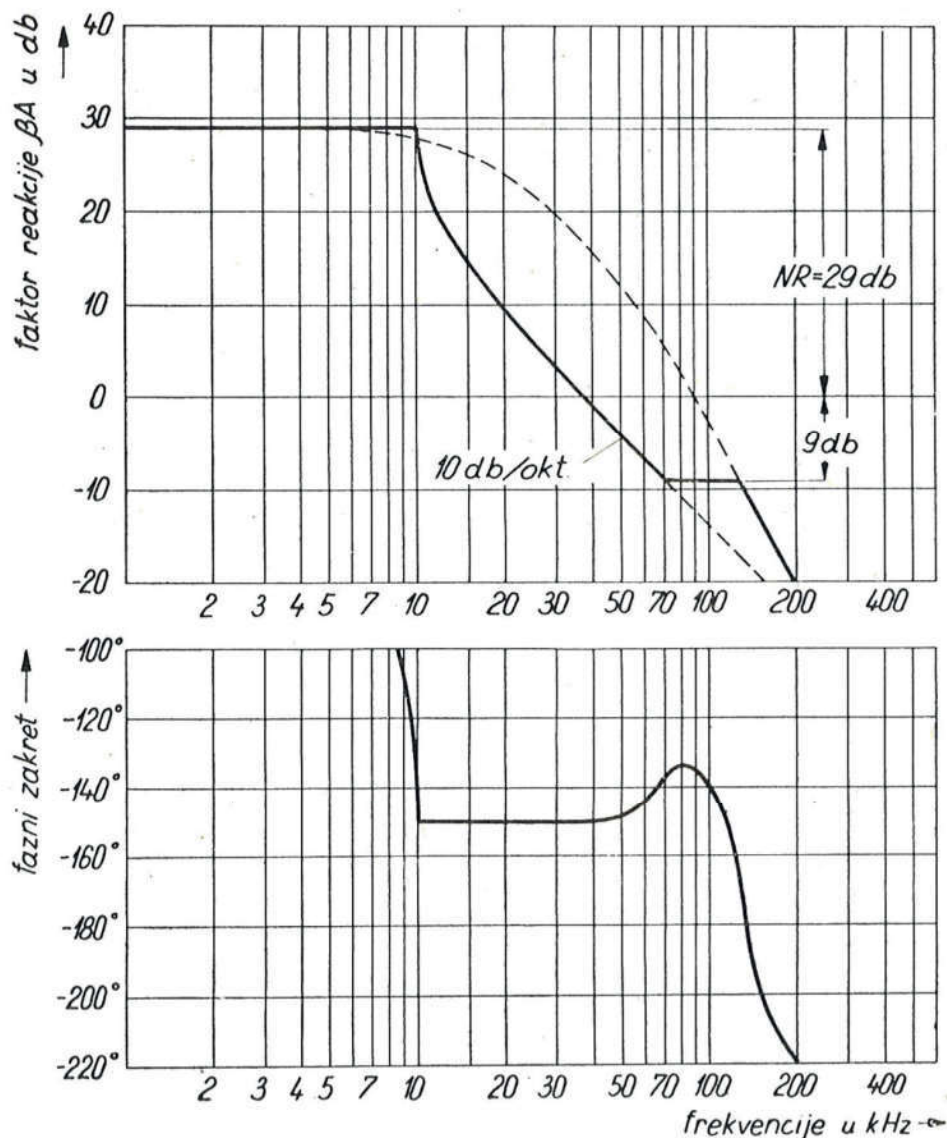
Sl. 123. Što je veći krajnji nagib stvarne karakteristike, to je uži pojas frekvencija, u kojem će se moći iskoristiti maksimalna NR (slika lijevo). Uz isti pojas konstantne NR veći krajnji nagib stvarne karakteristike smanjuje stupanj NR (slika desno).



Sl. 124. a) Skraćivanjem horizontalnog dijela stepenice kod prigušne karakteristike reakcionog napona nešto se pogorša fazna karakteristika. b) Skošnje stepenice ne uzrokuje pogoršanje fazne karakteristike.

7. Fazna karakteristika u slučaju odstupanja naponske karakteristike od oblika idealne karakteristike. — Bit će zanimljivo razmotriti, što se događa, ako naponska karakteristika odstupa od one, koja omogućuje maksimalnu NR. Razmotrit ćemo dva takva slučaja. U prvom slučaju neka horizontalni dio bude nešto kraći, nego što odgovara odnosu prema formuli (60). Kao što se vidi iz fazne karakteristike na sl. 124a, fazni kut se u području horizontalnog dijela naponske karakteristike nešto poveća. Ako se pojačalo projektira sa stannovitim faznim osiguranjem, kao što smo dosada imali, onda ovo povećanje faznog kuta nema praktičkog značenja.

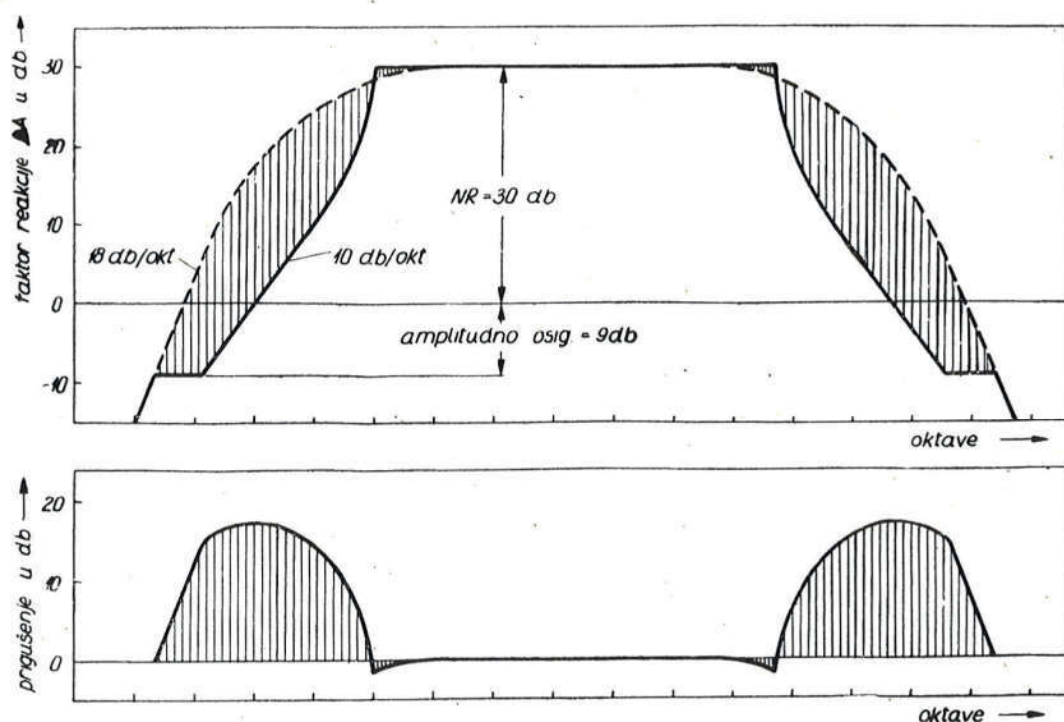
U drugom slučaju je, kao što pokazuje sl. 124b, gore spomenuti skraćeni horizontalni dio nadomješten kosim pravcem. Iz fazne karakteristike se vidi, da je ovdje nestalo onog spuštanja ispod horizontale, koje smo imali u prošlom



Sl. 125. Spuštanjem stepenice za desetak decibela ispod horizontale »nula decibela« dobiva se osiguranje, da eventualno povećanje reakcionog napona, do kojeg može doći u pogonskim prilikama, ne će dovesti pojačalo u oscilacije.

primjeru. Ovo je slučaj, koji za praksu ima veće značenje, jer je lakše realizirati naponsku karakteristiku, koja ima skošenje, nego onakvu s horizontalom.

8. Amplitudno osiguranje od oscilacija. — U području, u kojem fazna karakteristika prelazi 180° , ne smijemo dopustiti, da reakcioni napon bude po vrijednosti blizu naponu na rešetki, to jest ne smije βA biti tek nešto manje od 1. U tom slučaju bi, naime, i manja odstupanja u pojačanju kod dotičnih frekvencija uzrokovala samooscilacije. Obično se u praksi dobiva dovoljno veliko osiguranje, ako se projektiranje vrši na temelju idealne karakteristike za maksimalnu NR, kod koje je horizontala niža za 9 do 10 decibela od horizontale »nula decibela« reakcionog napona. To znači, da je u tom području reakcioni napon oko tri puta niži od napona na rešetki. Na sl. 125. nacrtana je idealna naponska karakteristika, koja uz otprije uvedeno fazno osiguranje



Sl. 126. Razlika između idealne i stvarne karakteristike reakcionog napona daje prigušnu karakteristiku, koju moraju imati korekcionni sklopovi.

od 30° (nagib od 10 decibela po oktavi) ima još i ovo naponsko osiguranje od nekih tri puta (9 db). Sasvim je razumljivo, da ovo osiguranje ide na račun ukupne NR, koja se za toliko smanji.

Kao što je na početku ovog razmatranja napomenuto, sve ovo, što je u vezi sa NR rečeno za područje visokih frekvencija, vrijedi i za područje niskih frekvencija.

9. Naponska karakteristika korekcionnih elemenata. — U slučaju, da je kod nekog pojačala potrebno primijeniti maksimalnu NR, treba prema poznatoj naponskoj karakteristici konstruirati stepeničastu idealnu karakteristiku s određenim faznim i amplitudnim osiguranjem. Razlike u vertikalnom smjeru između jedne i druge karakteristike daju novu karakteristiku, iz koje se vidi,

kakvu naponsku karakteristiku moraju imati sklopovi, koji se umeću bilo u pojačalo, bilo u reakcionu granu, ili kombinirano, da bi se od stvarne karakteristike dobila idealna karakteristika reakcionog napona. Iz gore rečenoga i opisa na samoj slici bit će sl. 126. razumljiva, i nije joj potrebno posebno tumačenje.

10. Što je jača negativna reakcija, to u širem pojasu frekvencija treba utjecati na frekventnu karakteristiku reakcionog napona. — Područje frekvencija, u kojem treba voditi računa o obliku frekventne karakteristike reakcionog napona, kad se radi o jakoj NR, vrlo je veliko. Kao približno pravilo vrijedi, da se ovo područje za svakih 10 decibela NR proširuje za jednu oktavu prema niskim i za jednu oktavu prema visokim frekvencijama. K tome još treba dodati po jednu do dvije oktave u vezi s faznim i amplitudnim osiguranjem. Iz toga slijedi, da kod nekog pojačala s korisnim područjem od 40 do 10.000 Hz (8 oktava) i 30 decibela NR širina područja projektiranja iznosi čak 18 oktava, a to je područje frekvencija od 1 Hz do 320.000 Hz!

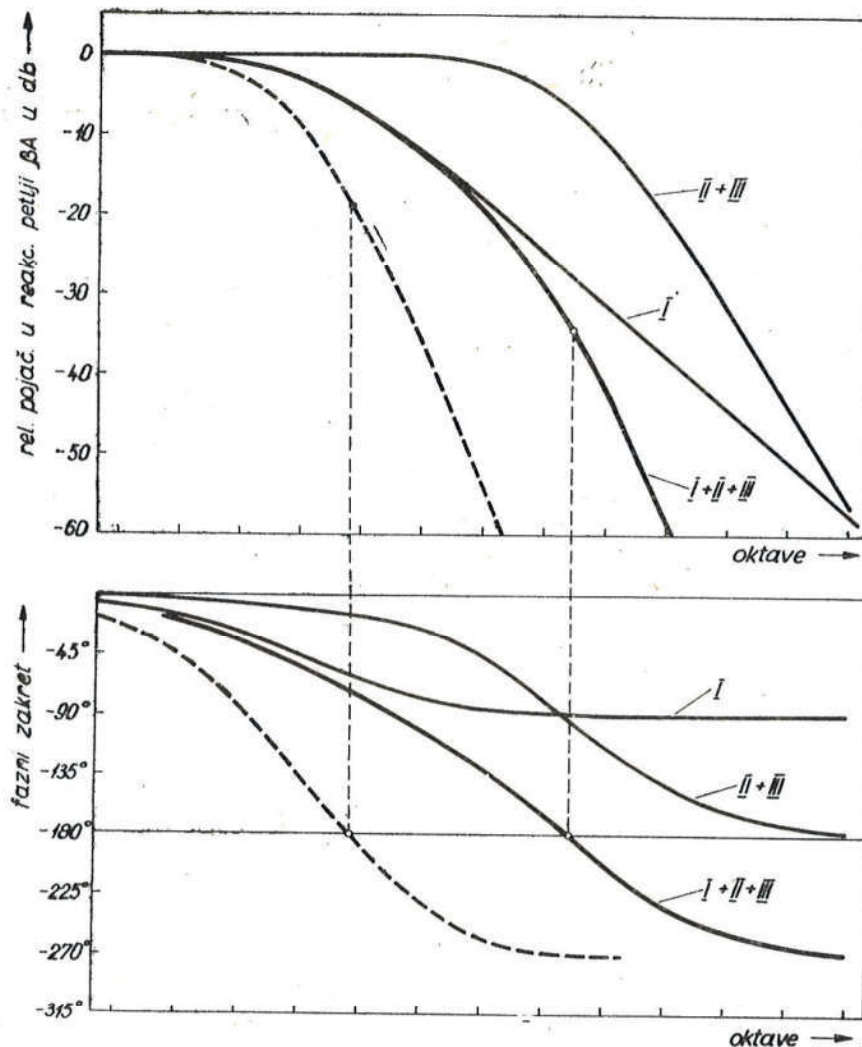
5. Stabiliziranje pojačala u području visokih frekvencija

1. Stabiliziranje pomoću stupnjevanja gornjih graničnih frekvencija. — Zakret faze kod višestepenog pojačala jednak je zbroju zakreta faza pojedinih stupnjeva. Ako su stupnjevi posve jednaki, onda do zakreta faze od 180° dolazi već kod velikih amplituda izlaznog napona. Zato u takvom slučaju nije moguće primijeniti jaču NR. Veće slabljenje izlaznog, pa prema tome i reakcionog napona kod zakreta faze od 180° može se dobiti tako, da se gornja granična frekvencija pojedinih stupnjeva učini različitom. Neka se, na primjer radi o trostepenom pojačalu, kod kojega u jednom slučaju svi stupnjevi imaju istu gornju graničnu frekvenciju, a u drugom slučaju neka su gornje granične frekvencije različite. Kao što vidimo iz sl. 127., do zakreta faze od 180° dolazi u prvom slučaju već kod frekvencije, kod koje je amplituda manja samo za 18 decibela od amplitude kod srednjih frekvencija. To znači, da se već sa NR od 18 decibela dolazi na prag oscilacija. No u drugom slučaju, gdje su granične frekvencije razmaknute, amplituda izlaznog napona padne za 34 decibela, pa tek onda dolazi do zakreta faze od 180° . Prednost stupnjevanja je, dakle, očita. Samo što udaljivanje graničnih frekvencija zadaje praktičke poteškoće. Ako se, na primjer, radi o dvostepenom pojačalu, onda uži pojas frekvencija odgovara pojasu korisnog područja, dok širi pojas mora daleko prelaziti korisno područje. Kod trostepenog pojačala jedan stupanj treba da ima uski pojas, dok ostala dva treba da prenose pojas velike širine. Kako kod RC-pojačala gornju graničnu frekvenciju u danom sklopu određuju parazitni kapaciteti, to je potrebno poduzeti mjere, da se početak utjecaja tih kapaciteta u jednom od stupnjeva kod dvostepenog pojačala, odnosno u dva stupnja kod trostepenog pojačala, pomakne na dovoljno visoke frekvencije. Na najjednostavniji način ovo se može izvesti tako, da se u dotičnim stupnjevima smanje u odgovarajućoj mjeri anodni otpori. Ovom metodom se, dakle, mogućnost povećanja NR dobiva na račun pojačanja pojačala, jer se smanjivanjem anodnih otpora smanjuje pojačanje.

2. Stabiliziranje pomoću kompleksnog djelitelja napona. — Na sl. 128. vidimo shemu jednog jednostavnog djelitelja napona, koji se često upotrebljava

za stabiliziranje pojačala u NR. Dijeljenje napona i zakret faze kod ovog kompleksnog djelatitelja ovise o frekvenciji samo u jednom području frekvencija, kao što se vidi iz dijagrama na slici.

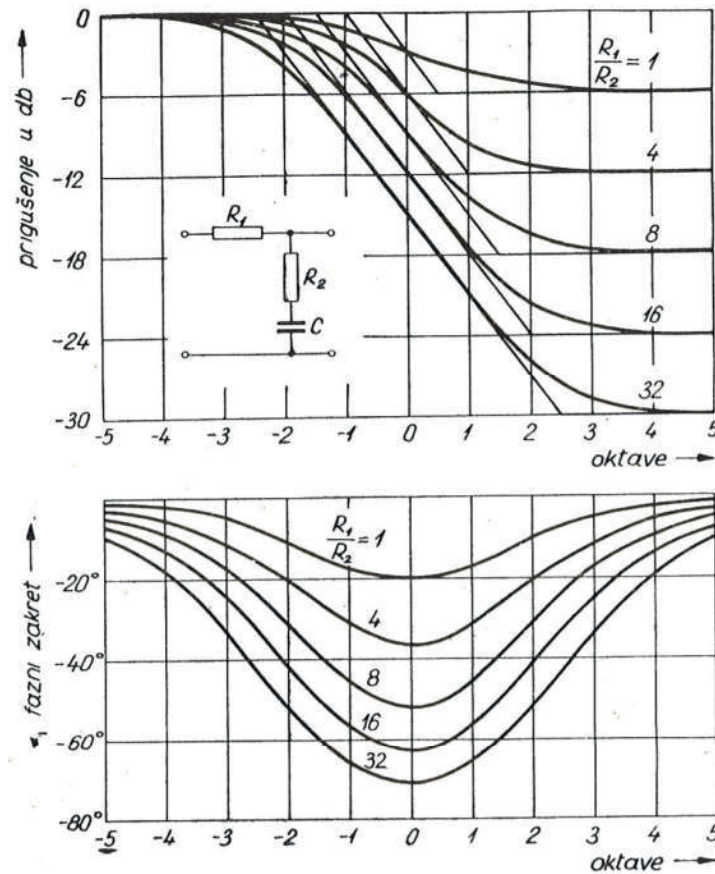
Uvrsti li se ovakav djelatitelj napona u petlju NR, i njegovi elementi tako dimenzioniraju, da se spuštanje napona i zakret faze završe upravo ispred one frekvencije, kod koje u pojačalu dolazi do zakreta faze za 180° , onda



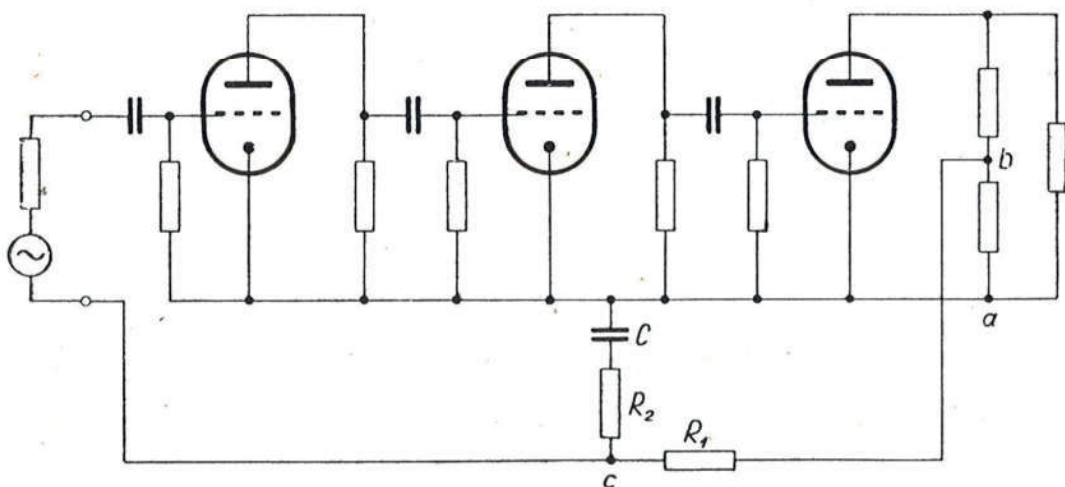
Sl. 127. Trostepeno pojačalo s jednakim stupnjevima ima zakret faze od 180° još kod velikih reakcionih napona, te se ne može primijeniti jača NR (crtkane karakteristike). Ako se dva stupnja izvedu sa znatno širim pojasom, pomakne se kritični zakret faze na mnogo niži reakcioni napon, što omogućuje jaču NR.

dolazi do stabiliziranja, odnosno mogućnosti povećanja NR. Ilustrirat ćemo ovo primjerom! Neka se radi o otpornom pojačalu, koje ima tri posve jednaka stupnja. Shemu ovakvog pojačala vidimo na sl. 129. Na djelatitelju napona u anodnom krugu izlaznog stupnja dobiva se između točaka *a* i *b* reakcioni napon, koji im naponsku i faznu karakteristiku prikazanu na sl. 130. Iz dijagrama se vidi, da bi se izravnim dovodenjem napona s točke *b* na ulaz

pojačala mogla postići NR od najviše 18 decibela (da se pojačalo dovede na prag oscilacija). Prilike će se promijeniti, ako se u reakcionu granu uvrsti gore spomenuti kompleksni djelitelj napona. U našem slučaju uvrstit ćemo

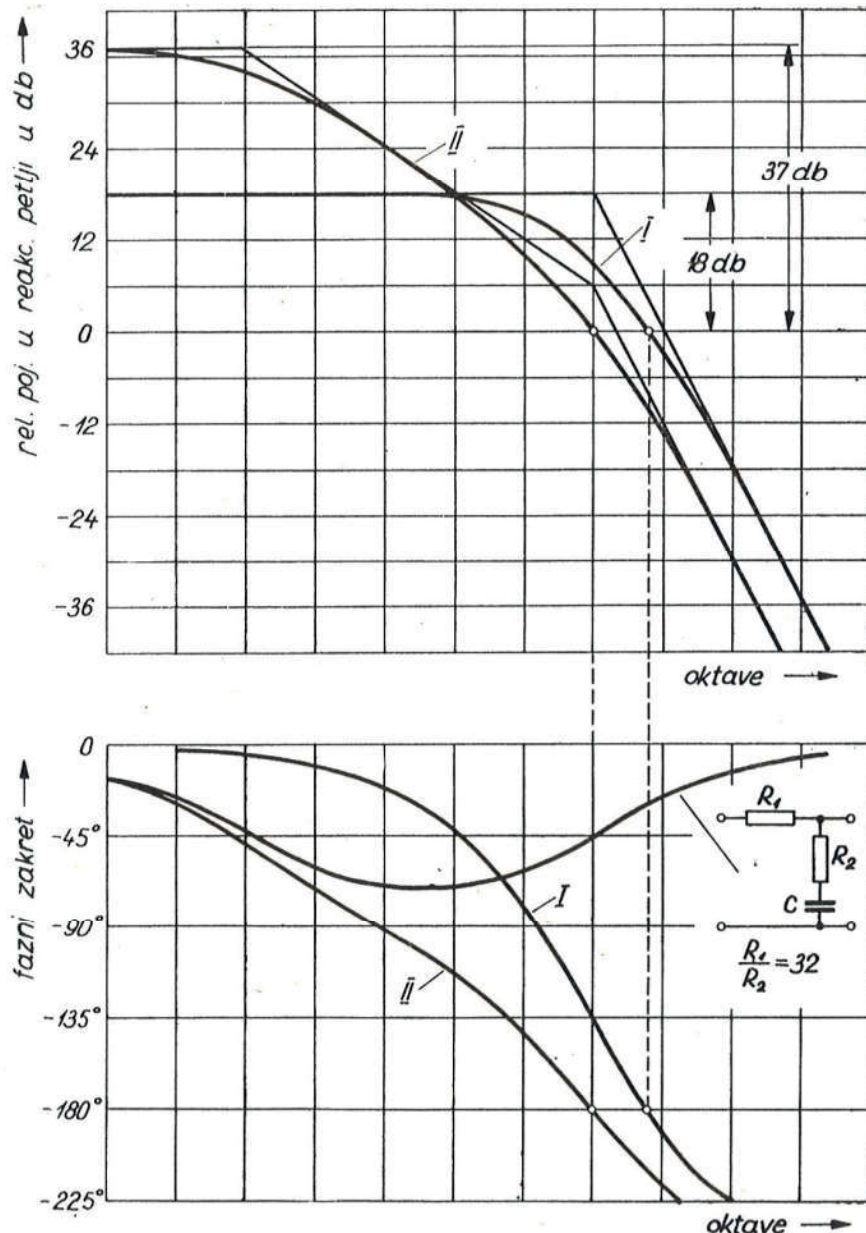


Sl. 128. Prigušna i fazna karakteristika kompleksnog djelitelja napona, koji se upotrebljava za stabiliziranje pojačala u NR.



Sl. 129. Pojačalo s kompleksnim djeliteljem napona u reakcionoj grani.

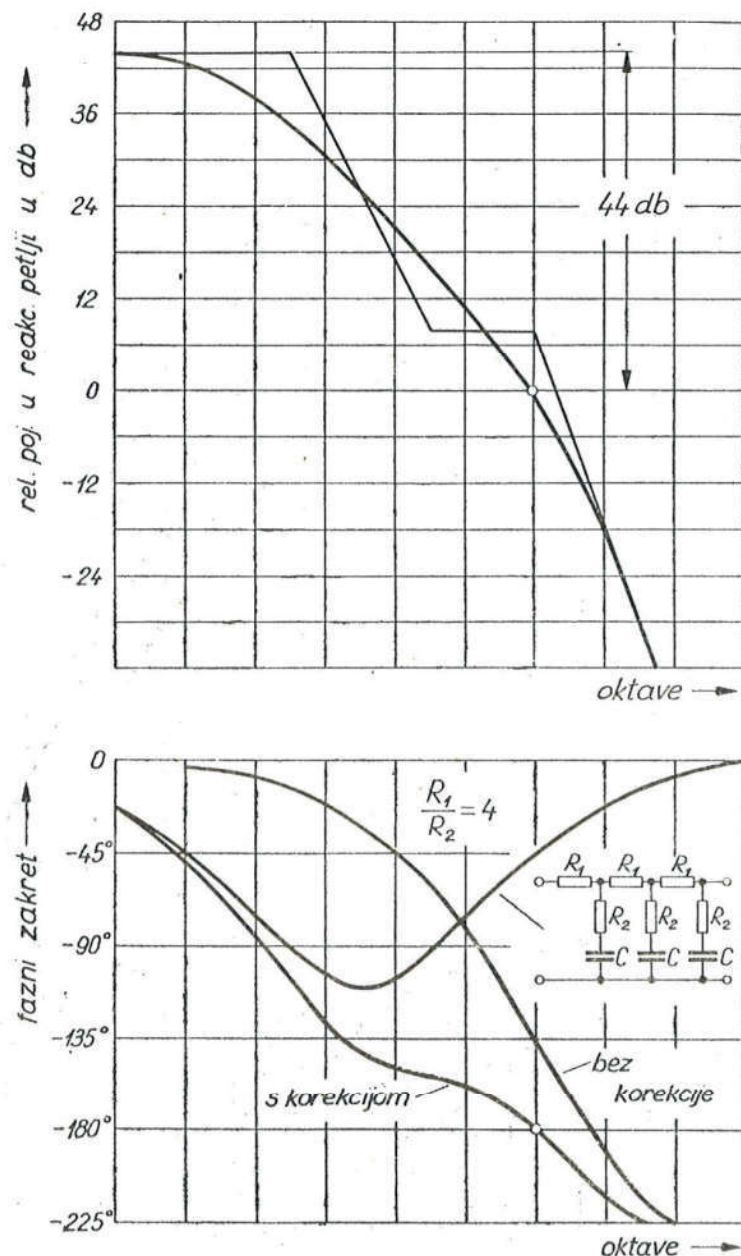
djelitelj, kod kojeg je odnos otpora $R_1/R_2 = 32$, tako da će napon biti oslabljen za 30 decibela. Na sl. 130. prikazana je i fazna karakteristika ovog djelitelja, koja pribrojena faznoj karakteristici napona u točki b daje faznu karakteristiku napona u točki c. Iz nove fazne karakteristike se vidi, da se je točka, u kojoj karakteristika siječe »horizontalu 180°«, pomakla nešto u lijevo, prema nižim frekvencijama. Ali se je zato odgovarajuća točka na novoj frekventnoj karakteristici reakcionog napona spustila za čitavih 19 decibela, što zajedno s prijašnjih 18 decibela daje 37 decibela. Uz primjenu ovog kompleksnog djelitelja napona uspjelo je, dakle, povisiti NR sa 18 decibela na



Sl. 130. Trostepeno pojačalo s jednakim stupnjevima ima prigušnu karakteristiku I, koja omogućuje NR od 18 decibela. Uvrštavanjem odgovarajućeg kompleksnog djelitelja napona u reakcionu granu dobiva se karakteristika II, uz koju se NR može povećati na 37 decibela.

37 decibela. Ovo je NR, koja pojačalo dovodi upravo na prag oscilacija. U praktičkoj izvedbi trebalo bi da NR bude 9 do 10 decibela slabija.

Pomoću kompleksnog djelitelja napona ovog tipa može se NR povećati i tako, da se upotrebi više jednakih djelitelja spojenih u kaskadu. Na sl. 131.



Sl. 131. Tri jednaka kaskadno spojena kompleksna djelitelja napona u reakcionoj grani daju trostepenom pojačalu s jednakim stupnjevima prigušnu karakteristiku, koja omogućuje vrlo jaku NR.

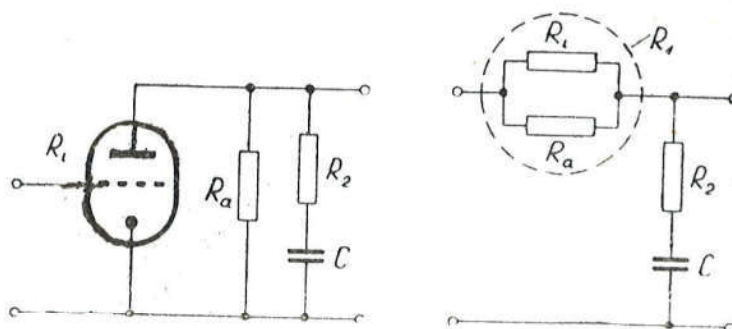
prikazane su frekventne i fazne karakteristike reakcionog napona kod istog pojačala, kao i prije, i to bez djelitelja, i s takvim djeliteljem, koji je sastavljen od tri uzastopno vezana djelitelja, od kojih svaki ima odnos otpora

$R_1/R_2 = 4$, odnosno slabljenje napona od 12 decibela. U ovom slučaju može se NR povećati na 44 decibela, pa da se tek onda dođe na prag oscilacija.

Na sl. 132. prikazano je, kako se kompleksni djelitelj napona gore opisanog tipa može izvesti kombiniranjem elemenata, koji već postoje u pojačalu. Otpor R_1 ovdje je sastavljen od paralelnog spoja unutarnjeg otpora elektronke i anodnog otpora. Da bi se dobio kompleksni djelitelj, potrebno je u ovom slučaju dodati samo dva elementa: otpor R_2 i kapacitet C .

Dobitak na NR plaćen je u svim ovim slučajevima širinom frekventnog pojasa reakcionog napona. Što je NR jača, to je ovaj pojas u danom slučaju uži. To znači da se sužava pojas, u kojem je NR konstantna.

3. Stabiliziranje na temelju idealne naponske karakteristike. — Suprotno prije navedenim metodama idealna naponska karakteristika omogućuje: 1. da se unaprijed odredi fazno i amplitudno osiguranje, 2. da se održi konstantna NR u korisnom području, i 3. da se eventualna prevelika širina frekventnog pojasa suzi na potrebnu vrijednost.



Sl. 132. Ako se normalnom sklopu elektronke doda serijski spoj sastavljen od otpora R_2 i kapaciteta C , dobiva se kompleksni djelitelj napona.

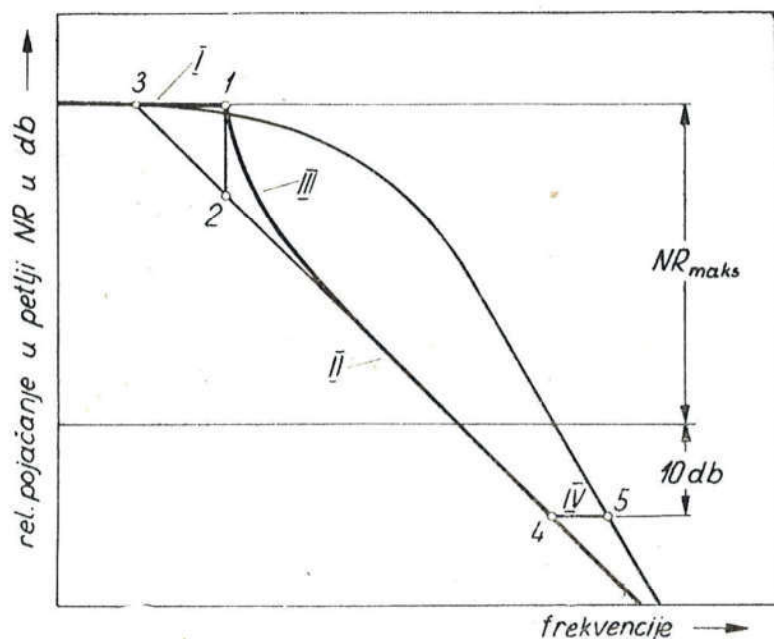
Kod projektiranja pojačala s maksimalnom NR na temelju idealne stepeničaste naponske karakteristike postupaju se ovim redom:

1. Nacrta se idealna naponska karakteristika za maksimalni fazni kut od 150° , i to ovako: U koordinatnom sustavu, u kojem su na horizontalnoj osi nanese frekvencije u logaritamskoj podjeli (ili oktave u linearnoj podjeli), a na vertikalnoj osi odnosi napona u decibelima, povuče se horizontala do krajnje frekvencije pojasa, koji se želi prenijeti. U ovom području frekvencija bit će NR konstantna. U dijagramu na sl. 133. označena je ova horizontala sa I . Od krajnje točke na horizontali (točka 1) nanese se vertikalno prema dolje dužina, koja predstavlja sniženje napona za 10 decibela. Kroz donju točku ove dužine (točka 2) i točku 3, koja na horizontali I leži na polovini frekvencije u točki 1, povuče se pravac II . Ovaj pravac ima nagib od 10 decibela po oktavi, što odgovara faznom osiguranju od 30° . Zatim se točka 1 spoji s pravcem II pomoću krivulje III . Ova se krivulja daje, istina, točno proračunati, no takva točnost najčešće nije potrebna, jer ionako u praktičkoj izvedbi možemo idealnu karakteristiku postići tek približno.

2. Na temelju podataka dobivenih proračunom ili mjerenjem nacrta se frekventna karakteristika izlaznog napona, i to tako, da se u području srednjih frekvencija ova karakteristika poklapa s horizontalom I . Kao što znamo

otprije, karakteristika izlaznog napona je u isti čas i karakteristika reakcionog napona, samo s različitom horizontalom »nula decibela«.

3. Iz krajnjih nagiba stvarne i idealne karakteristike nađe se po formuli (60) odnos frekvencija, koje pripadaju krajnjim točkama stepenice. Budući da se radi o logaritmičkoj skali, to istom odnosu frekvencija odgovara ista dužina. Ako se, na primjer, radi o odnosu 18 db prema 10 db, onda je dotična dužina jednaka dijelu horizontalne osi između 18 kHz i 10 kHz, ili između



Sl. 133. Konstrukcija idealne stepeničaste karakteristike reakcionog napona za dobivanje maksimalne NR.

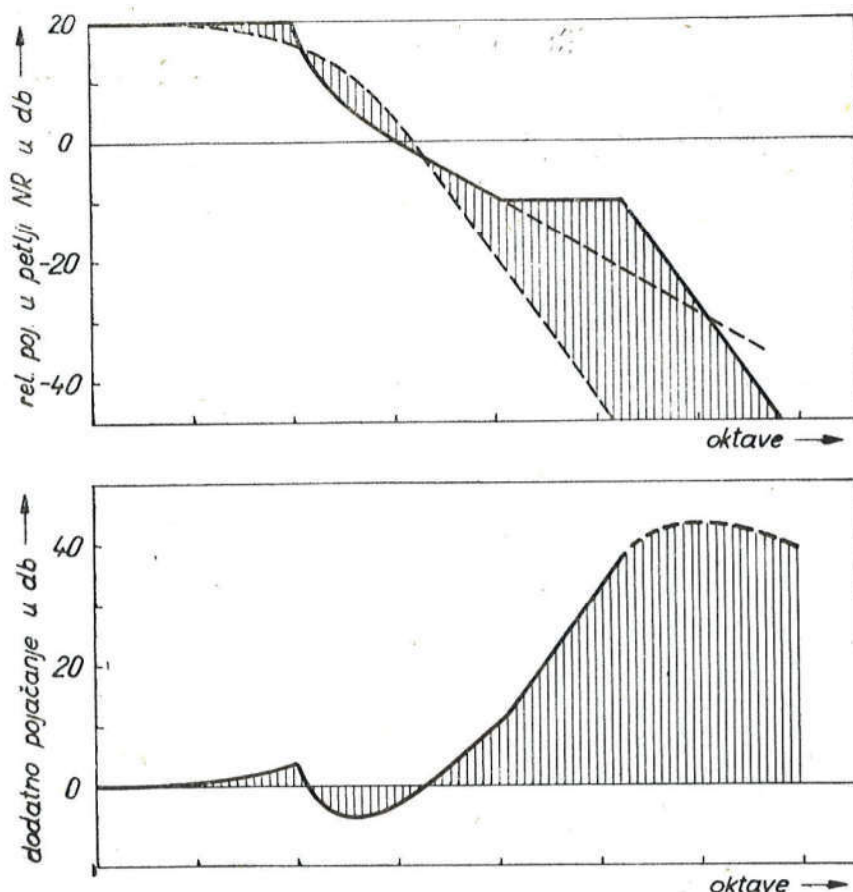
9 kHz i 5 kHz, ili također između 4,5 kHz i 2,5 kHz, što je sve isto. Ova dužina se u horizontalnom položaju postavi među karakteristike tako, da lijevim svojim krajem dodiruje idealnu, a desnim stvarnu karakteristiku. Time se dobiju krajnje točke stepenice 4 i 5. Vertikalna udaljenost stepenice IV od horizontale I izražena u decibelima daje vrijednost, koja, umanjena za 10 decibela (amplitudno osiguranje), predstavlja maksimalnu NR.

4. Vertikalne udaljenosti između stvarne i idealne karakteristike nanesu se u posebni dijagram, kakav vidimo na sl. 126.

5. Odaberu se, proračunaju ili odrede pokusom elementi i sklopovi, koji će stvarnu karakteristiku reakcionog napona u što većoj mjeri približiti idelnoj stepeničastoj karakteristici, to jest, koji će imati naponsku karakteristiku što bližu onoj, koju smo spomenuli u točki 4.

Sa NR-om može se ići i preko one, koju smo nazvali maksimalnom. No to nije normalan slučaj, jer tada za postizavanje idealne stepeničaste naponske karakteristike treba upotrebiti posebno pojačalo. Na sl. 134. prikazana je stvarna i idealna karakteristika za takav slučaj, kada je potrebno primijeniti posebna sredstva. U području ispod stepenice stvarna karakteristika se nalazi tako daleko ispod idealne karakteristike, da je idealnu karakteristiku moguće postići samo posebnim pojačalom. Ovakvo pojačalo pojačava malo ili

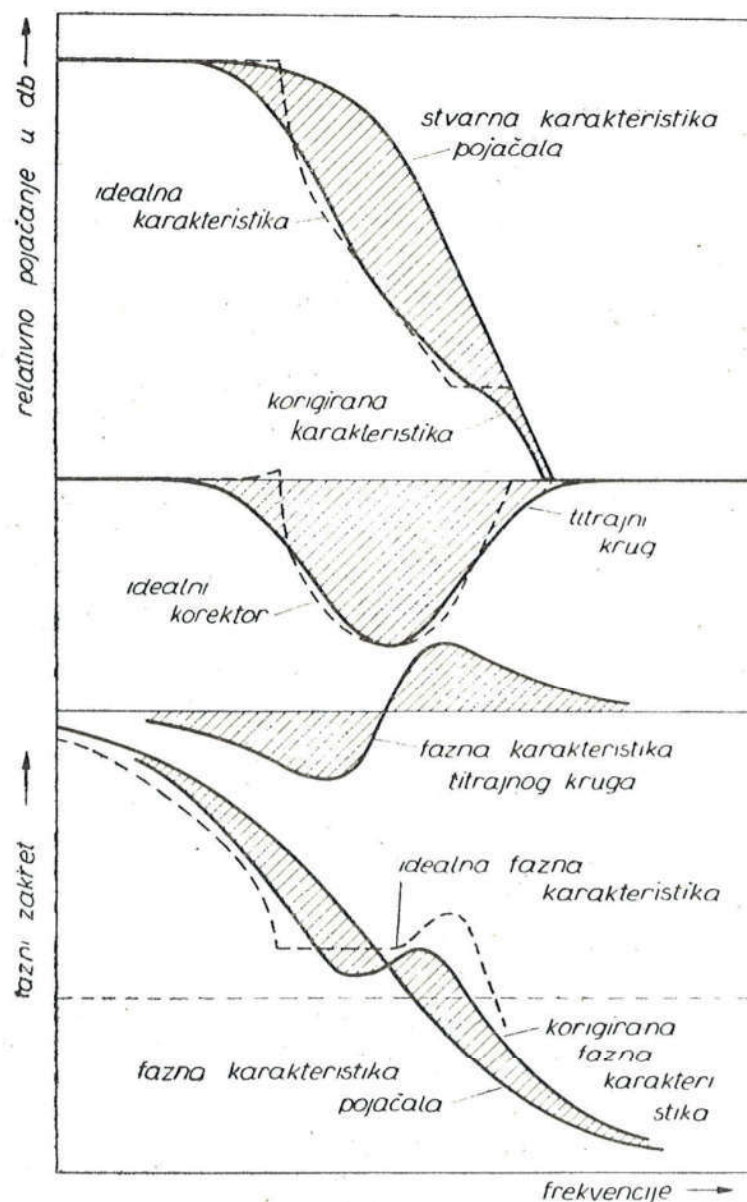
ništa u korisnom području, dok njegovo pojačanje ispod stepenice raste. Iznad frekvencije, koja odgovara rubu stepenice, pojačanje dodatnog pojačala može padati, ali krajnji nagib karakteristike dodatnog pojačala treba da nastupi u području frekvencija, koje su mnogo više od frekvencije ruba stepenice. Korekciono pojačalo može se bilo dodati glavnom pojačalu, bilo uvrstiti u reakcionu granu.



Sl. 134. Ako se idealna stepeničasta karakteristika nalazi iznad stvarne karakteristike pojačala, treba razliku u naponima nadoknaditi posebnim pojačalom.

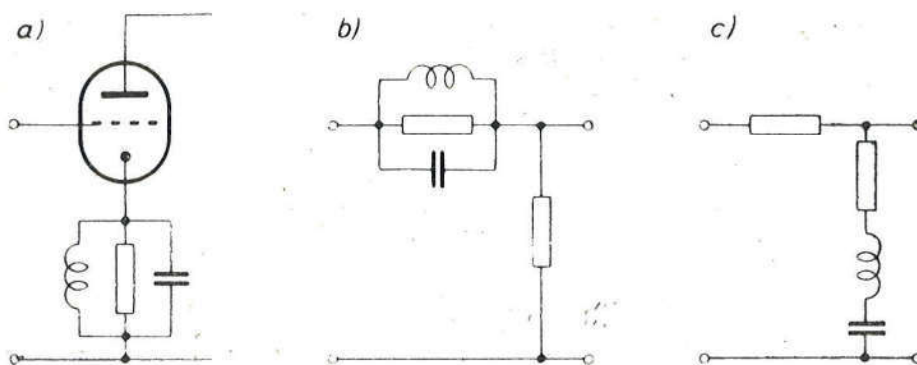
4. Korekcionni filtri za približavanje idealnoj stepeničastoj naponskoj karakteristici. — Kako bi se od normalne naponske karakteristike pojačala dobila približno idealna stepeničasta karakteristika, uvrštava se bilo u samo pojačalo, bilo u reakcionu granu, titrajni krug. Na sl. 135. se vidi, kako zbog promjena amplitude i faze, što ih unosi titrajni krug, dolazi do približenja idealnoj naponskoj i faznoj karakteristici. Da li će se upotrebiti serijski ili paralelni titrajni krug, ovisi o mjestu, na koje se stavlja. Ako se uvrštava u anodni krug elektronke, dolazi u obzir serijski titrajni krug. Impedancija serijskog titrajnog kruga je oko rezonantne frekvencije manja, dakle u anodnom krugu djeluje manja impedancija, te je pojačanje manje, kao što je potrebno. Naprotiv, ako se titrajni krug uvrštava u katodu (odnosno u reakcionu granu), onda to treba da bude paralelni titrajni krug. Ovo će nam biti

jasno, ako se sjetimo, kako na naponsku i faznu karakteristiku djeluje katodna impedancija. Vidjeli smo u poglavlju 3., da se katodna impedancija pojavljuje spojena u seriju s otporom, koji je jednak recipročnoj vrijednosti strmine elektronke. Posve analogno će se u slučaju, kad katodnu impedanciju pred-

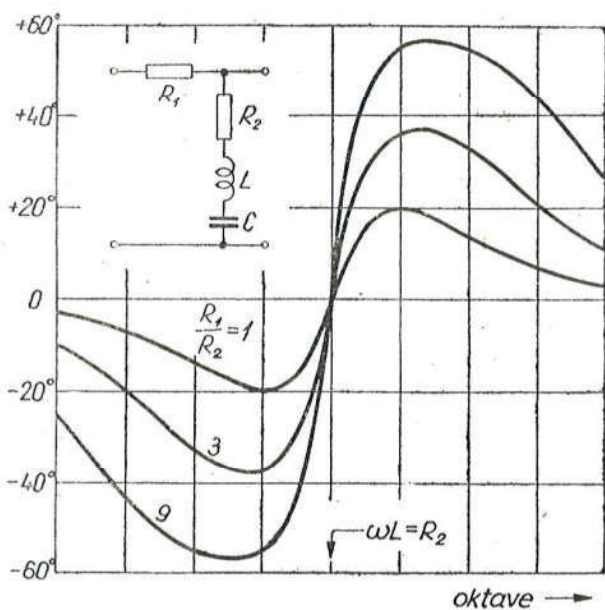
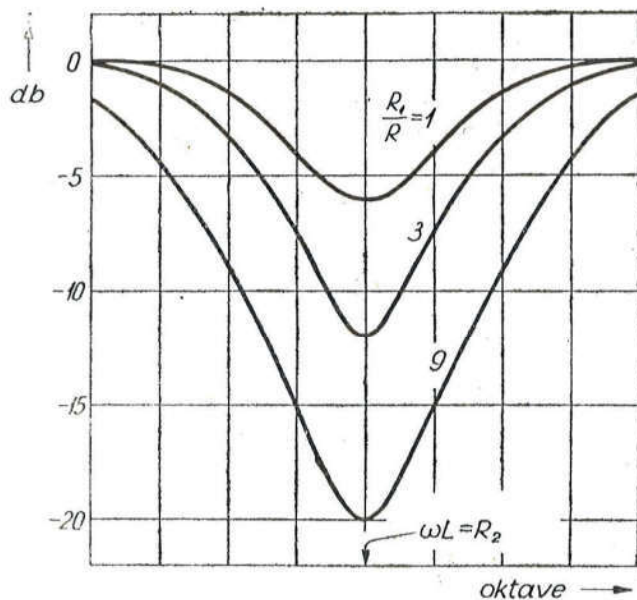


Sl. 135. Pomoću titrajnog kruga kao korektora amplitude i faze moguće je u velikoj mjeri približiti se idealnoj stepeničastoj karakteristici i njoj odgovarajućoj faznoj karakteristici.

stavlja paralelni titrajni krug, ova impedancija pojaviti spojena u seriju s isto takvim otporom (sl. 136.). Napon, koji se dobiva na izlazu ovog sklopa, posve je istog karaktera po amplitudi i fazi, kao i napon sklopa, u kojem se između izlaznih priključnica nalazi odgovarajući serijski titrajni krug.

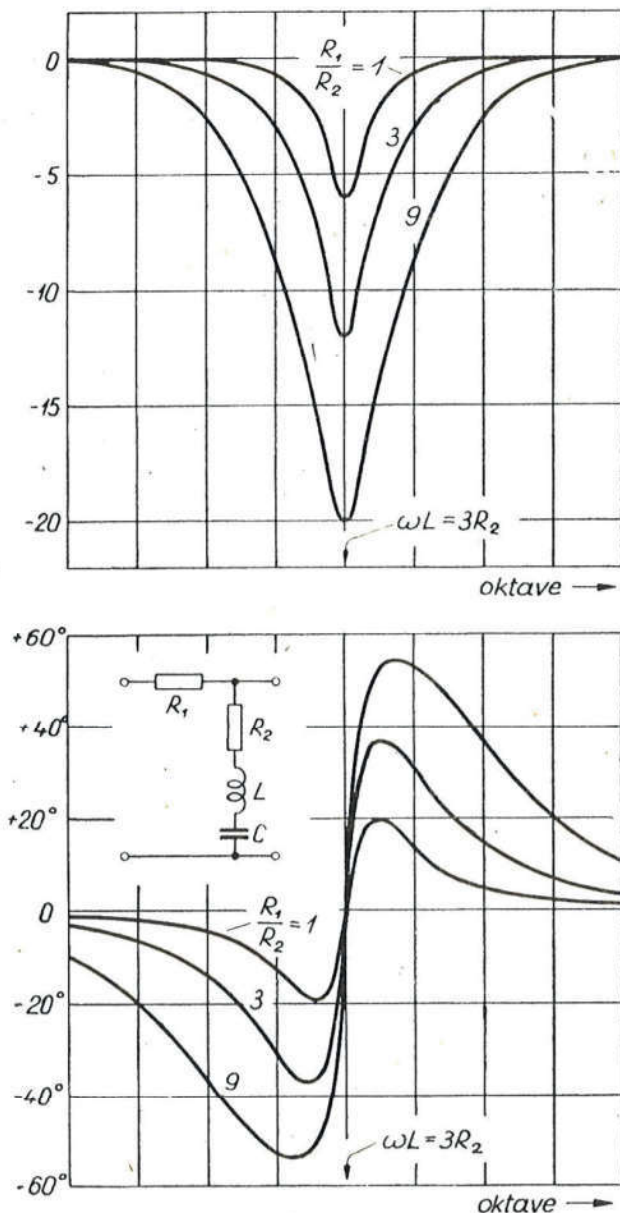


Sl. 136. Paralelni titrajni krug u katodi elektronke daje jednaku napon-sku i faznu karakteristiku, kao da je ovaj krug uvršten u seriju s odgo-varajućim otporom, ili kao da je odgovarajućem otporu u seriju dodan serijski titrajni krug.



Sl. 137. Prigušne i fazne karakteristike korekci-onog filtra sa serijskim titrajnim krugom, ko-jemu je kod rezonantne frekvencije otpor induktiviteta (odnosno otpor kapaciteta) jednak otporu R_2 .

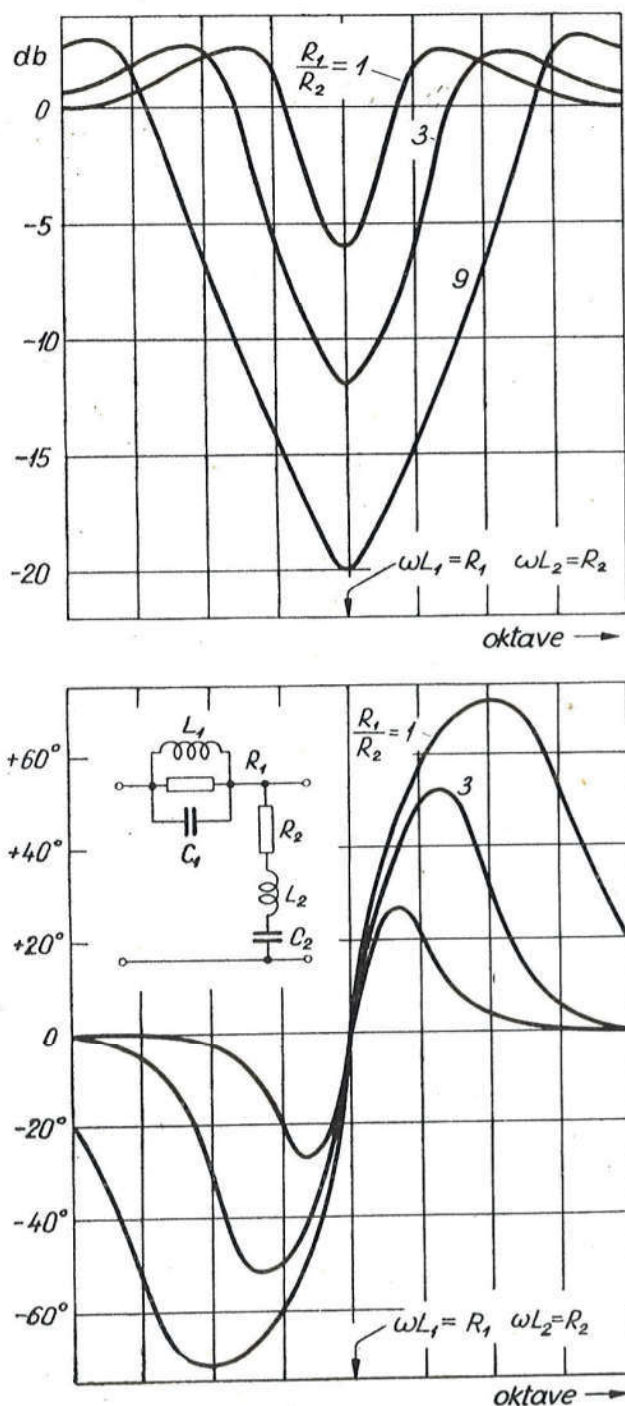
Na idućih nekoliko slika (sl. 137., 138. i 139.) date su naponske i fazne karakteristike titrajnih krugova u sklopovima, koji se mogu primijeniti kod projektiranja pojačala sa NR.



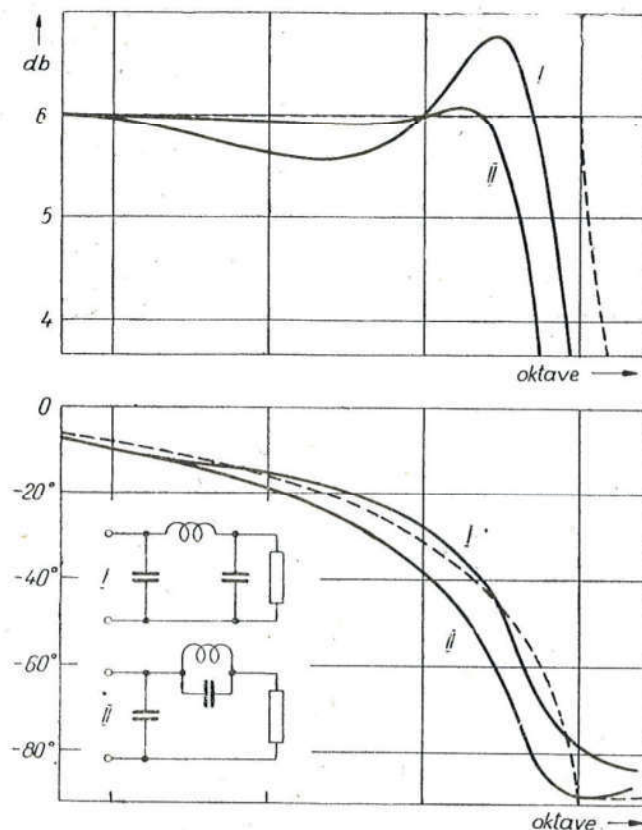
Sl. 138. Prigušne i fazne karakteristike korekcionog filtra sa serijskim titrajnim krugom, kojemu je otpor induktiviteta (odnosno otpor kapaciteta) kod rezonantne frekvencije jednak trostrukom otporu R_2 .

5. Proširivanje pojasa prenošenih frekvencija. — Pomoću titrajnih krugova može se dobiti izdizanje napona kod najviših frekvencija, i time korisno područje proširiti, a da ne dođe do povećanog faznog zakreta. No sa približavanjem idealnoj naponskoj karakteristici u ovom području frekvencija ne ide se u tonfrekventnoj tehnici, jer nije potrebno. Ove mjere poduzimaju se kod

širokopojasnih pojačala, kakva se upotrebljavaju, na primjer, u televizijskoj tehnici. Kao sastavni elementi korekcionih titrajnih krugova iskorištavaju se parazitni kapaciteti u pojačalu, kao što je, na primjer, ulazni kapacitet elektronke. Na sl. 140. vidimo dva takva sklopa s titrajnim krugovima, dok su u dijagramima prikazane njihove naponske i fazne karakteristike.



Sl. 139. Prigušne i fazne karakteristike korekcionog filtra kombiniranog od paralelnog i serijskog titrajnog kruga.



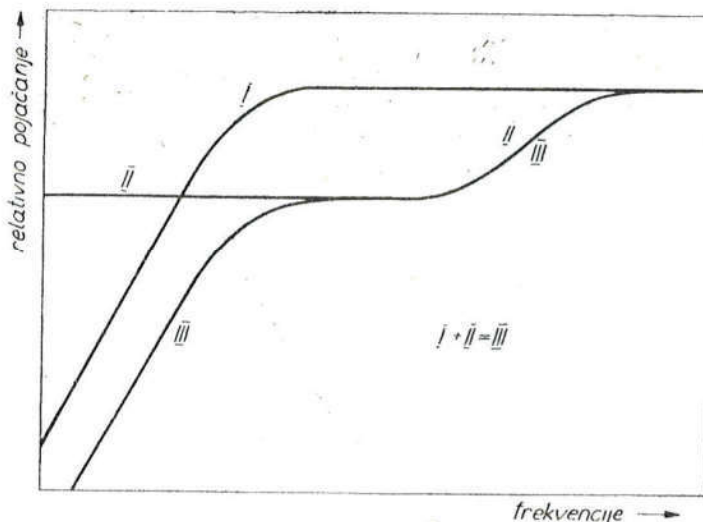
Sl. 140. Prigušne i fazne karakteristike korekcionih filtara, pomoću kojih se može proširiti pojas konstantnog pojačanja. Crtkane karakteristike su idealne karakteristike.

6. Stabiliziranje pojačala u području niskih frekvencija

1. Stabiliziranje pomoću katodnih impedancija i impedancija zaštitnih rešetaka. — Kao što se vidi iz sl. 126., ne postoji s obzirom na stvarnu i idealnu naponsku karakteristiku nikakva bitna razlika između područja visokih i niskih frekvencija. Razlika između stvarne i idealne frekventne karakteristike izlaznog, odnosno reakcionog napona, i u jednom i u drugom slučaju je takva, da korekcionni elementi moraju u oba frekventna područja imati slične naponske karakteristike. Iz toga bi slijedilo, da ćemo i u području niskih frekvencija za dobivanje idealne stepeničaste karakteristike upotrebiti titrajne krugove. To bi u principu bilo moguće, no iz praktičkih razloga tako se ipak u stvarnoj izvedbi ne postupa. Za praksu je prikladnije, da se za približavanje idealnoj naponskoj karakteristici upotrebe kompleksni djelitelji napona sastavljeni od otpora i kapaciteta. Pri tome je povoljna okolnost, što sami normalni sastavni elementi pojačala predstavljaju takve kompleksne djelitelje napona, pomoću kojih se može dobiti stepeničasta naponska karakteristika. Mi smo ih već upoznali! To je sklop, koji se dobiva u vezi s katodnom impedancijom, i sklop u vezi s impedancijom zaštitne rešetke. Ovi sklopovi djeluju tako, da u jednom području frekvencija spuštaju pojačanje

na nižu vrijednost, koja takva prema nižim frekvencijama ostaje. U području spuštanja dolazi i do faznog zakreta.

Na sl. 141. se vidi, kako se kombinacijom karakteristike, koju ima međustepeni CR-sklop, i karakteristike, koju daje katodna impedancija, odnosno impedancija zaštitne rešetke, dobiva stepeničasta karakteristika. Da bi se stepenica dobila, mora područje spuštanja ovih posljednjih karakteristika biti kod viših frekvencija, nego što je kod karakteristike međustepenog CR-sklopa.

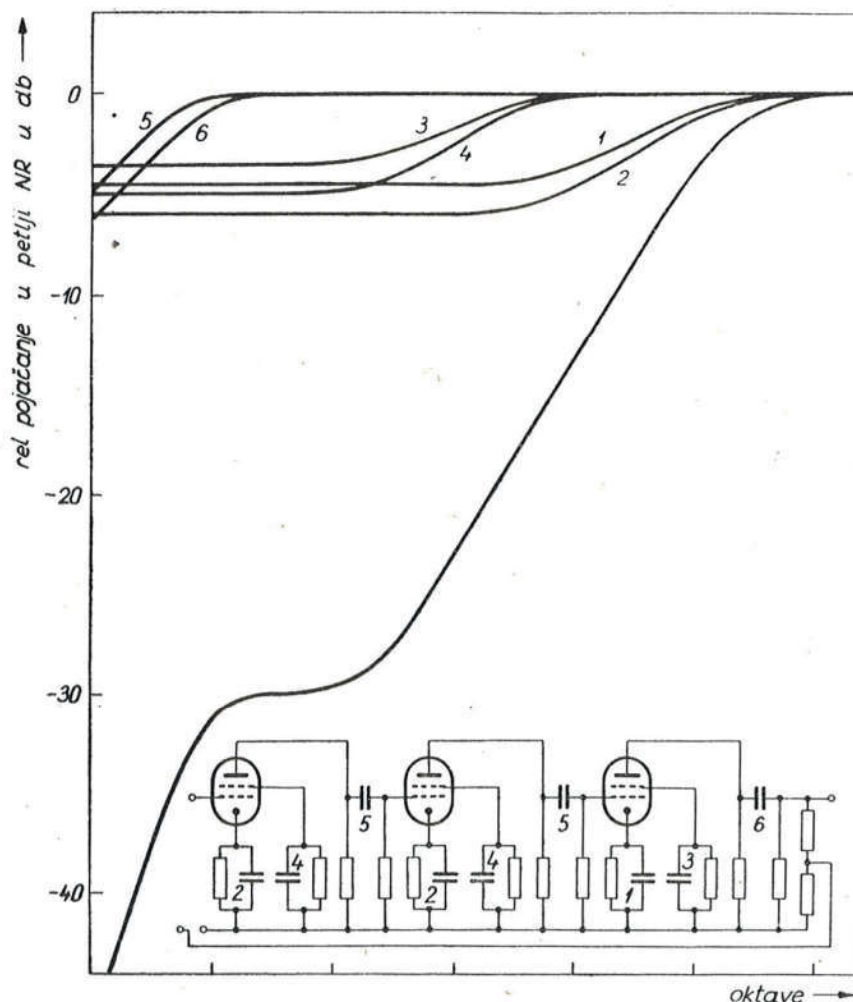


Sl. 141. Kombinacijom prigušne karakteristike veznog CR-spoja (I) i prigušne karakteristike, koja se dobiva djelovanjem katodne impedancije, odnosno impedancije zaštitne rešetke (II), dobiva se stepeničasta karakteristika (III).

Budući da oba korekciona sklopa zakreću fazu u istom smjeru, dužinu stepenice treba odabrati prema najvećem dopustivom faznom zakretu. Sama stepenica može se pomicati bilo prema višim bilo prema nižim frekvencijama. Granicu prema višim frekvencijama određuje početak korisnog područja, jer utjecaj katodne impedancije, odnosno impedancije zaštitne rešetke, ne smije pasti u to područje. Prema nižim frekvencijama granicu određuje CR-produkt međustepenog veznog spoja. Ovaj produkt ne može biti po volji velik, i to iz praktičkih razloga. Otpor u rešetki je u vezi sa svojstvima elektronke ograničen. Obično se s ovim otporom ne ide preko jednog megaoma, a kod izlaznih elektronki uzima se i znatno niža vrijednost. Povećavanje kapaciteta spojnog kondenzatora ograničeno je njegovim izolacionim otporom. Što je kapacitet veći, to je izolacioni otpor kondenzatora manji. Kako je ovaj kondenzator vezan s anodom prethodne elektronke, to preko izolacionog otpora dolazi pozitivni napon na rešetku naredne elektronke i pomiče njezinu radnu točku.

Spretnim odabiranjem CR-produkata međustepenih impedancija, katodnih impedancija i impedancija zaštitnih rešetki može se kod višestepenih pojačala dobiti karakteristika, koja je po obliku vrlo bliza idealnoj stepeničastoj karakteristici. Takav slučaj prikazan je na sl. 142. Ovdje se radi o trostepenom otpornom pojačalu, kod kojeg su u sva tri stupnja upotrebljene pentode. Međustepeni spojni CR-elementi imaju skoro jednake CR-produkte te

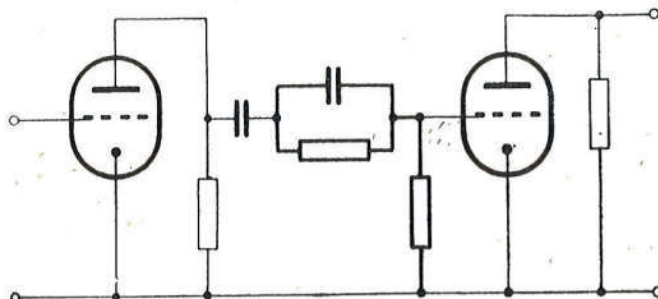
se njihove naponske karakteristike gotovo poklapaju. Karakteristike, koje daju katodne impedancije i impedancije zaštitnih rešetaka, tako su međusobno postavljene, da se zbrajanjem dobiva karakteristika s konstantnim krajnjim nagibom od 10 decibela po oktavi sve do stepenice.



Sl. 142. Vremenske konstante CR-elemenata, koji na prigušnu karakteristiku pojačala djeluju u području najnižih frekvencija, mogu se tako odabrati, da prigušna karakteristika ima stepeničast oblik. Brojevi uz karakteristike u vezi su s brojevima na shemi, a naznačuju, koja se karakteristika dobiva s dotičnim CR-elementom u pojačalu.

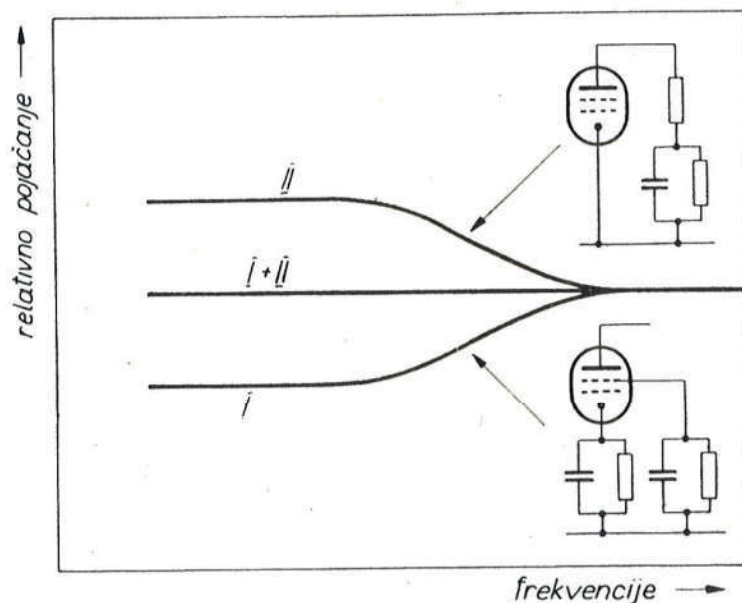
2. Kompleksni djelitelj napona. — Katkada se pomoću katodnih impedancija i impedancija zaštitnih rešetaka ne može postići dovoljno veliko oslabljenje napona najnižih frekvencija. U tom slučaju se u krug pobudne rešetke može umetnuti kompleksni djelitelj napona odgovarajućih svojstava, kao što to pokazuje sl. 143. Područje spuštanja napona treba odabrati prema istom kriteriju, kao što je gore navedeno u vezi sa katodnom impedancijom i impedancijom zaštitne rešetke.

3. Filtarska anodna impedancija. — Kod pojačala djeluje kao zakretač faze još jedna impedancija, koju smo upoznali. To je filtarska anodna impedancija. Naponska i fazna karakteristika ove impedancije upravo je obrnuta od one, što je ima katodna impedancija i impedancija zaštitne rešetke. Zato



Sl. 143. Stepeničasta prigušna karakteristika može se dobiti također pomoću kompleksnog djelitelja napona, koji se uvrsti u krug pobudne rešetke.

se anodna filtarska impedancija može upotrebiti za poništenje utjecaja impedancije u katodi ili u zaštitnoj rešetki (sl. 144.). Ako se početak izdizanja, što ga uzrokuje anodna filtarska impedancija, postavi približno kod iste frekvencije, kod koje međustepeni CR-sklop uzrokuje spuštanje, dobiva se ka-

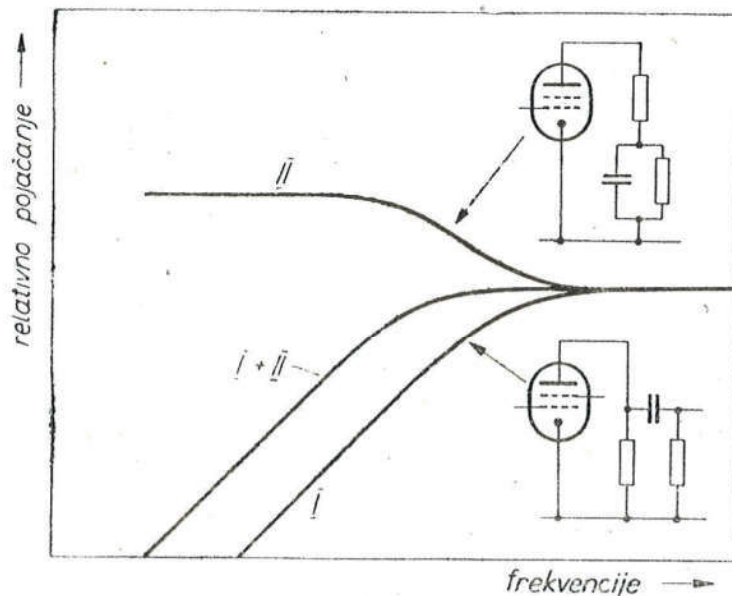


Sl. 144. CR-elementi u zaštitnoj rešetki i katodi djeluju na prigušnu karakteristiku suprotno od anodne filtarske impedancije, pa se izborom prikladnih vremenskih konstanti može njihovo djelovanje međusobno poništiti.

rakteristika s početkom spuštanja kod nižih frekvencija (sl. 145.). Možemo općenito reći: CR-produkt anodne filtarske impedancije treba tako odabrati,

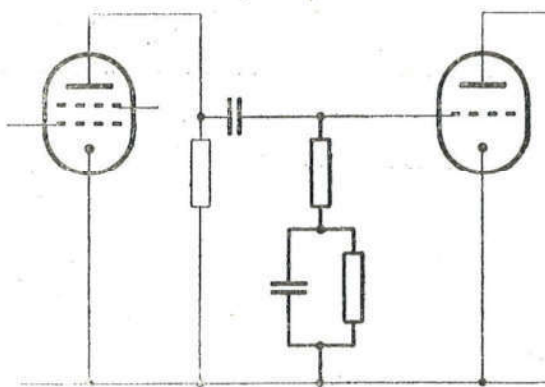
da se dobije karakteristika, koja će u kombinaciji s karakteristikama ostalih sklopova dati što povoljniju stepeničastu karakteristiku.

4. Sklop, koji nadomješta filtarsku anodnu impedanciju. — Za izdizanje napona najnižih frekvencija nije uvijek prikladna filtarska anodna impedan-



Sl. 145. Anodna filtarska impedancija može se iskoristiti za proširivanje frekventnog pojasa u području najnižih frekvencija.

cija. Može se, naime, dogoditi, da su za tu svrhu potrebni vrlo veliki kapaciteti, što čini praktičke poteškoće. No isti se efekat može postići umetanjem paralelnog CR-spoja u krug pobudne rešetke, kao što pokazuje sl. 146. U ovom slučaju se radi o većoj impedanciji, te se izlazi s manjim kapacitetom.

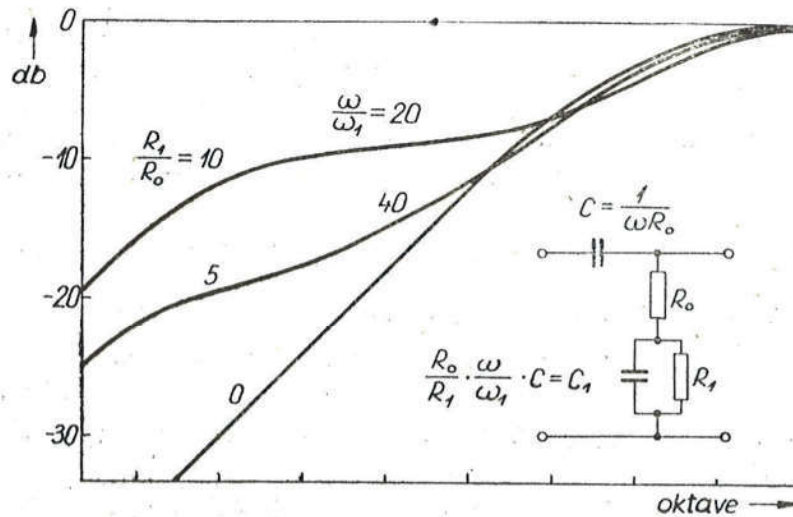


Sl. 146. Ovakav spoj u krugu pobudne rešetke djeluje jednako kao anodna filtarska impedancija.

Oblik naponske karakteristike, koju daje ovaj sklop u vezi sa spojnim kondenzatorom, ovisi o odnosu u sklop uključenih otpora i kapaciteta. Iz dijagrama na sl. 147. vidi se, da naponske karakteristike imaju približno stepe-

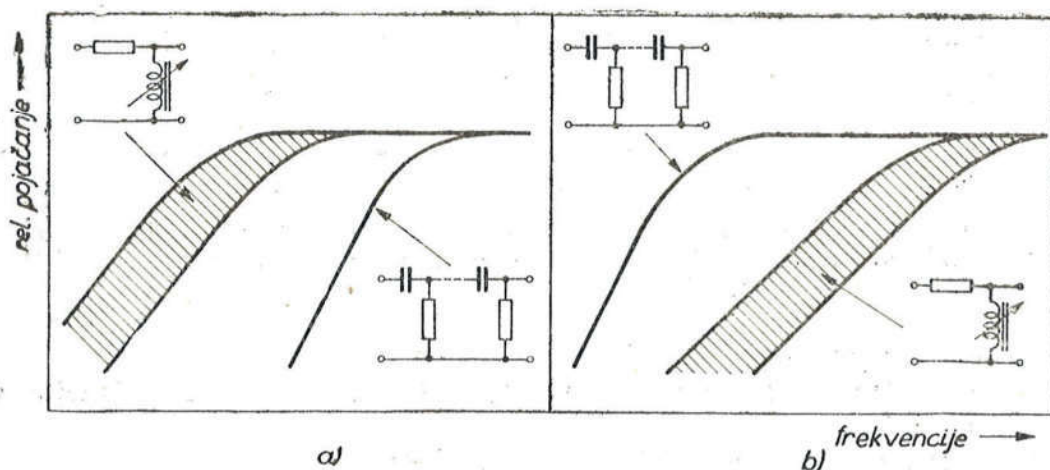
ničast oblik, kao što je poželjno. Kombiniranjem s drugim elementima pojačala mogu se karakteristike još poboljšati.

5. Izlazni transformator ima promjenljivu graničnu frekvenciju. — Primarni induktivitet izlaznog transformatora ovisan je o amplitudi napona. Kod niskih napona induktivitet je manji, te je granična frekvencija viša.



Sl. 147. Približno stepeničastu prigušnu karakteristiku ima u zajednici sa veznim kapacitetom spoj, koji nadomješta anodnu filternu impedanciju.

Uz visoke napone pomakne se granična frekvencija prema nižim frekvencijama. Budući da primarni induktivitet (zajedno s unutarnjim otpor elektronke i paralelno spojenim transformiranim opterećenim otporom) djeluje na naponsku i faznu karakteristiku isto tako, kao što djeluju međustepeni CR-spojevi, treba paziti na to, da granične frekvencije ovih elemenata ne bi bile jednake. Da bi se naime dobio pomak kritičnog faznog zakreta u područje što nižih frekvencija, treba granične frekvencije razmaknuti



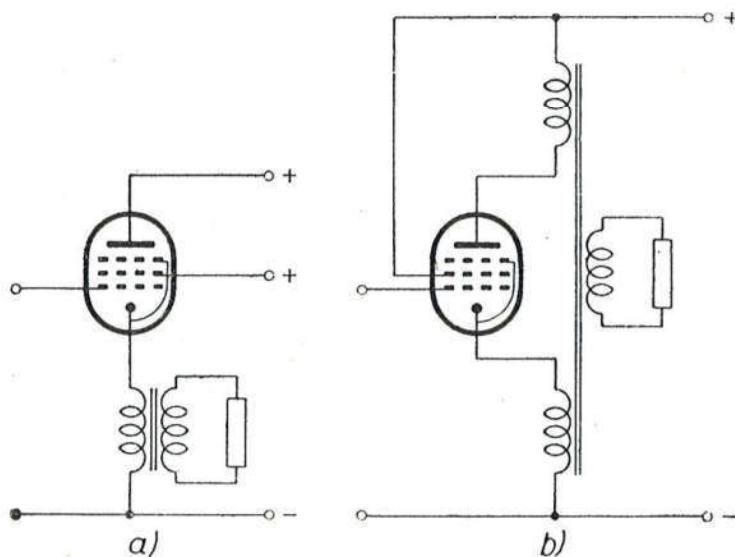
Sl. 148. a) Uz manju vremensku konstantu veznih CR-elemenata kritičan je minimalan induktivitet primara transformatora. b) Ako je vremenska konstanta veznih elemenata veća, kritičan je maksimalan induktivitet.

(vidi poglavlje 6. ove glave, odsjek 1.). Pri tome se može postupiti tako, da granična frekvencija CR-elemenata bude više od one, koju daje transformator. U tom slučaju je kritičan minimalan induktivitet (induktivitet kod niskih napona), jer on daje najvišu graničnu frekvenciju transformatora (sl. 148a). Obrnuto je u slučaju, kad su CR-elementi oni, koji imaju nižu graničnu frekvenciju. Tada je kritičan maksimalan induktivitet (sl. 148b). Ako su u prvom slučaju granične frekvencije međusobno jednake ili približno jednake, onda može doći do oscilacija, kad na ulazu pojačala nema signala. U drugom slučaju do nestabilnosti dolazi onda, kad se zbog velikih amplituda signala poveća induktivitet i time granične frekvencije izjednače, odnosno približe.

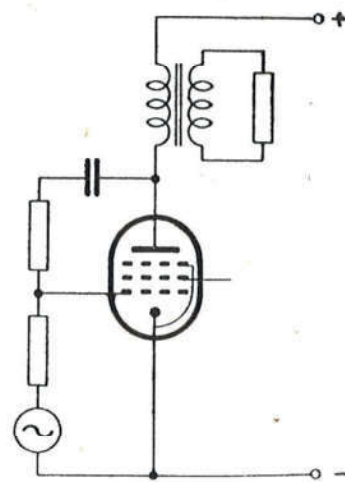
7. Izlazni transformator u petlji negativne reakcije

Izlazni transformator se može u petlju NR uključiti na više načina. Prema tome, da li se napon za NR uzima s primarnog, sekundarnog ili terciarnog namota, naziva se ovakva NR *primarnom*, *sekundarnom* ili *tercijarnom*.

1. Primarna negativna reakcija. — Najjednostavniji oblik primarne NR dobiva se tako, da se primar transformatora uvrsti u katodni krug elektronke. Time se zapravo dobiva katodno pojačalo (sl. 149a). Ovakav sklop ima ove prednosti:



Sl. 149. a) Katodno pojačalo s transformatorom na izlazu. b) Izlazni stupanj s jednim dijelom primara u katodi.



Sl. 150. Izlazni stupanj s paralelnom NR.

1. Jednostavan je za izvedbu.
 2. Neosjetljiv je na anodno brujanje, jer je izlazna impedancija vrlo malena.
 3. Zbog jake NR izobličenje je vrlo maleno.
- No ovaj sklop ima i ozbiljnih nedostataka:
1. Na signalnu rešetku potrebno je dovoditi vrlo visoke izmjenične napone, što stavlja velike zahtjeve na predstupanj.

2. Ako se za žarenje elektronke ne upotrebi poseban namot, nastaje veliki napon između žarne niti i katode, što nije dopustivo.
3. Da bi se kod tetroda i pentoda dobio stalan potencijal zaštitne rešetke prema katodi, potrebno je za dovodenje napona zaštitnoj rešetki primijeniti specijalne mjere.

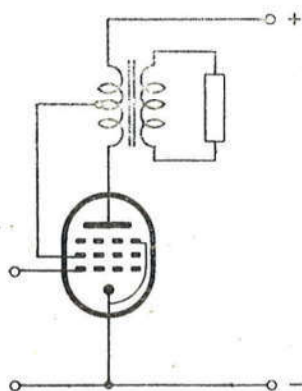
Zbog gornjih nedostataka primarna NR ove vrste jedva da ima primjenu u praksi. Kompromisno rješenje predstavlja sklop, u kojem je samo jedan dio primarnog namota spojen s katodom, kao što je učinjeno u shemi na sl. 149b.

Uzimanjem napona za NR s anode izlazne elektronke uzimamo ga zapravo s primara transformatora (sl. 150.). Ovaj se način često primjenjuje i ima ove prednosti:

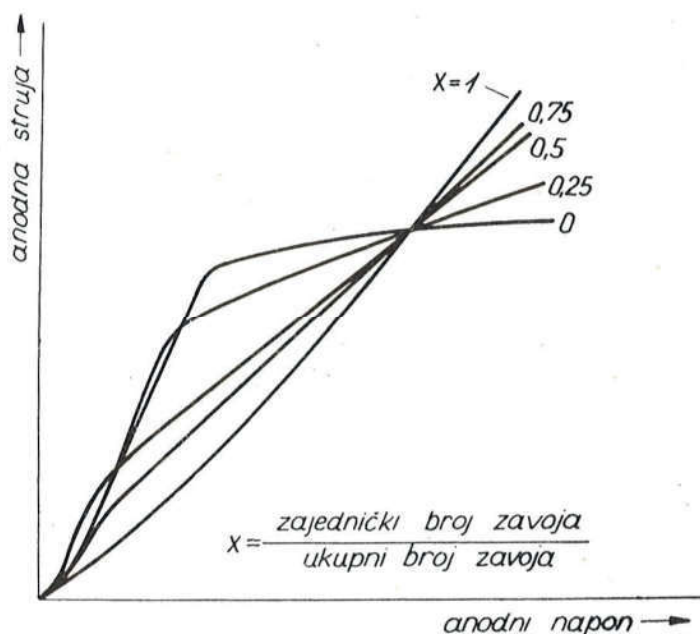
1. Smanjuje unutarnji otpor elektronke, čime se smanjuje harmoničko izobličenje transformatora kod niskih frekvencija.
2. Omogućuje jaču NR bez većih komplikacija, jer je ovdje transformator spojen petlji NR paralelno, te ne djeluje u znatnijoj mjeri na zakret faze (najveći mogući zakret je 90°).

Nedostaci su ovi:

1. Ovakva NR djeluje samo u manjoj mjeri na prigušna i harmonička izobličenja transformatora, i to samo indirektnim putem, to jest time, što smanjuje unutarnji otpor elektronke. Kod visokih frekvencija djeluje suprotno, jer se prigušno izobličenje, koje uzrokuje rasipni induktivitet transformatora, povećava zbog smanjenja unutarnjeg otpora elektronke.
2. Kao što je izloženo u glavi trećoj, zbog smanjenja unutarnjeg otpora elektronke povećava se napon brujanja na transformatoru, dakle na opterećenom otporu, te je potrebno anodni napon jače filtrirati.

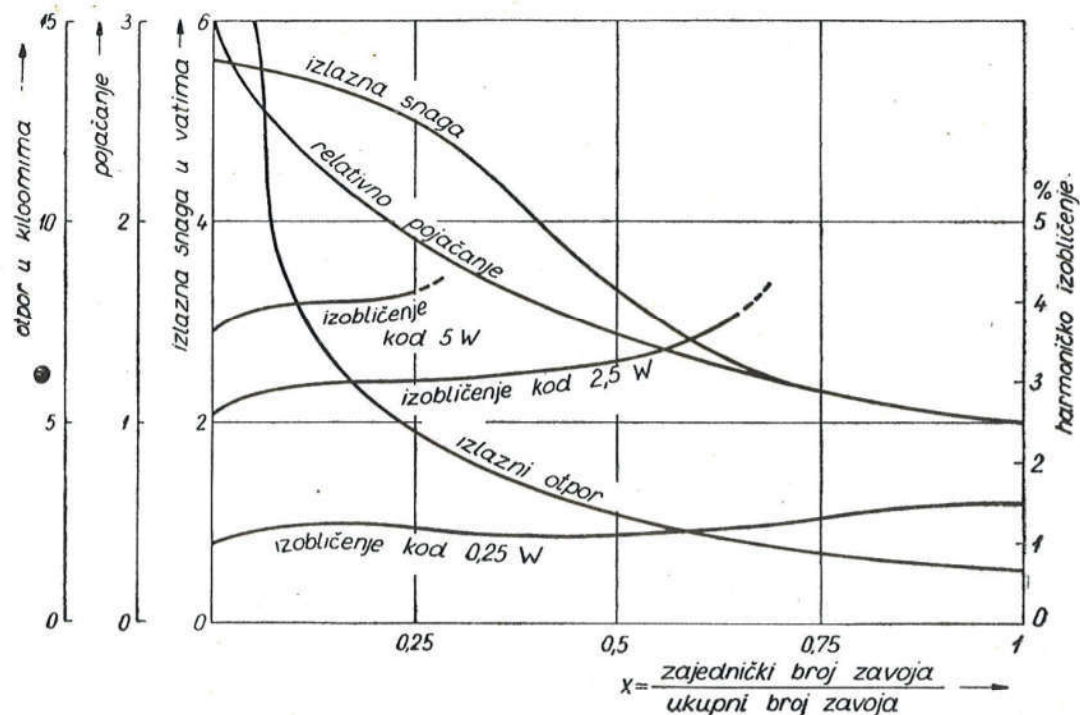


Sl. 151. Sklop sa NR, koja je izvedena spajanjem dijela primara izlaznog transformatora sa zaštitnom rešetkom.



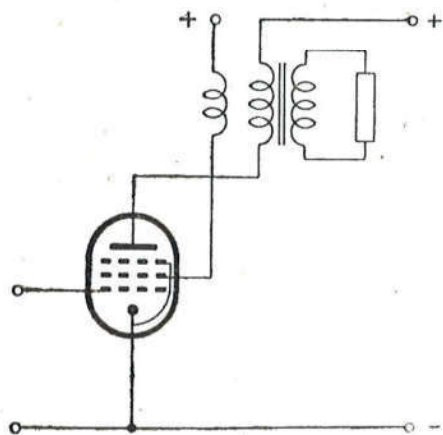
Sl. 152. Pomicanjem odvojka na primaru transformatora na sl. 151. odozgo prema dolje (povećavanjem odnosa x od 0 do 1) dobivaju se karakteristike elektronke, koje se mijenjaju od pentodnih do triodnih.

Primarni namot može se u NR uključiti i tako, da se napon s primara dovodi zaštitnoj rešetki (sl. 151.). O mjestu odvojka ovisi stupanj NR. Ako se napon za zaštitnu rešetku uzima s gornjeg kraja primara na sl. 151., dobiva se običan sklop s pentodom (odnosno tetrodom). Spajanjem donjeg kraja primara, dakle anode, sa zaštitnom rešetkom, dobiva se trioda. Idući s odvojkom

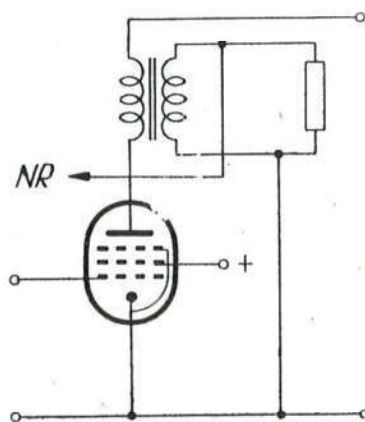


Sl. 153. Ovisnost izlazne snage, pojaćanja, harmoničkog izobličenja i izlaznog otpora o mjestu reakcionog odvojka za zaštitnu rešetku na primaru transformatora.

odozgo prema dolje prelazi se postepeno s pentode na triodu. Kako se mijenjaju anodne karakteristike u ovakvom slučaju, vidi se iz sl. 152. No nijedan položaj odvojka ne može se smatrati najboljim sa svakog stanovišta. To se najbolje vidi iz karakteristika na sl. 153. Maksimalna izlazna snaga (određena



Sl. 154. Dobivanje reakcionog napona za zaštitnu rešetku s posebnog (tercijarnog) svitka transformatora.



Sl. 155. Sekundarna NR.

pojavom struje rešetke), pojačanje i unutarnji otpor opadaju s povećavanjem stupnja NR. Faktor izobličenja uz konstantnu snagu ostaje praktički neovisan o stupnju NR sve do preopterećenja.

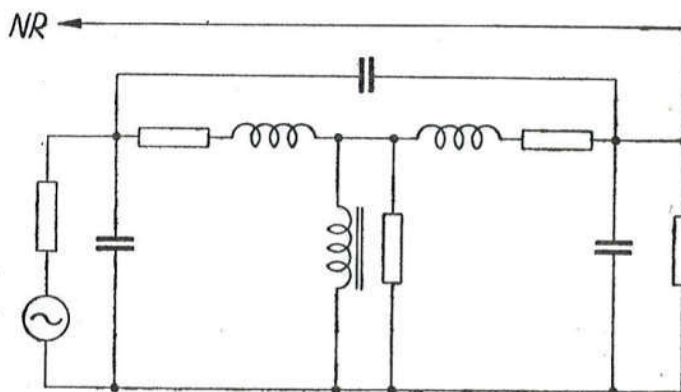
Reakcioni napon za zaštitnu rešetku može se dobiti i preko posebnog pomoćnog namota, kao na sl. 154., koji je magnetski čvrsto vezan s primarom (u idealnom slučaju motan bifilarno). Ovaj način ima tu prednost, što se zaštitnoj rešetki može dovesti napon drugačije vrijednosti od anodnog, ako je to potrebno da bi se dobili optimalni uvjeti za rad elektronke.

Razlika između NR na zaštitnoj rešetki i NR na pobudnoj rešetki je u tome, što zaštitna rešetka unosi u petlju NR nelinearnost, i što se s povišenjem stupnja NR smanjuje dopustiva anodna amplituda, pa dakle i snaga (zbog negativnih amplituda napona na zaštitnoj rešetki).

2. Sekundarna negativna reakcija. — Sekundarna NR (sl. 155.) ima pred primarnom NR ove prednosti:

1. Uz isto smanjenje pojačanja kao s primarnom NR, dobiva se sa sekundarnom NR, uzevši sasvim općenito, veća širina frekventnog pojasa (veće smanjenje prigušnog izobličenja).
2. Harmonička izobličenja, do kojih kod niskih frekvencija dolazi zbog nelinearne ovisnosti magnetske gustoće o magnetskom naponu, manja su (uz isto smanjenje pojačanja) kod sekundarne NR, nego kod primarne NR.
3. Napon brujanja, koji se na transformatoru, pa dakle i na opterećenom otporu, pojavljuje zbog nedostatnog anodnog filtriranja, manji je uz sekundarnu NR, kao što je obrazloženo u glavi trećoj.
4. Kad se radi o pojačalu visoke kvalitete, mnogo je lakše NR-u s protufaznog izlaznog stupnja na jednofazni stupanj izvesti kao sekundarnu, nego kao primarnu (simetrija!).
5. Izlazni otpor pojačala manji je sa sekundarnom NR nego s primarnom, jer sekundarna NR prividno smanjuje također otpore transformatora na isti način, kao i unutarnji otpor elektronke.

Nezgodna strana primjene sekundarne NR je u tome, što lako dolazi do oscilacija. Kao što se vidi iz sl. 156., na kojoj je prikazana nadomjesna shema



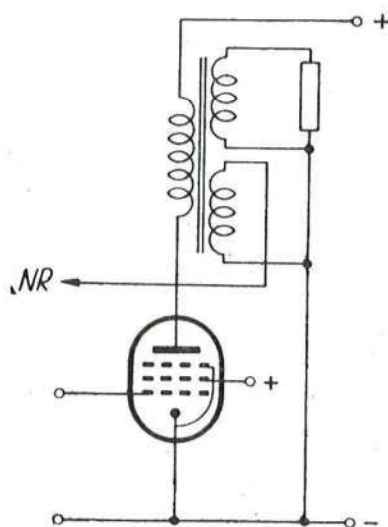
Sl. 156. Nadomjesna shema izlaznog transformatora u vezi sa NR.

transformatora, sastavni elementi su takvog karaktera i tako međusobno spojeni, da čine titrajne krugove i mogu uzrokovati zakret faze od 180° . Zato rezonantne frekvencije, kod kojih dolazi do ovakvog zakreta faze, moraju biti daleko iznad čujnog područja. To znači, da u slučaju primjene jače sekundarne

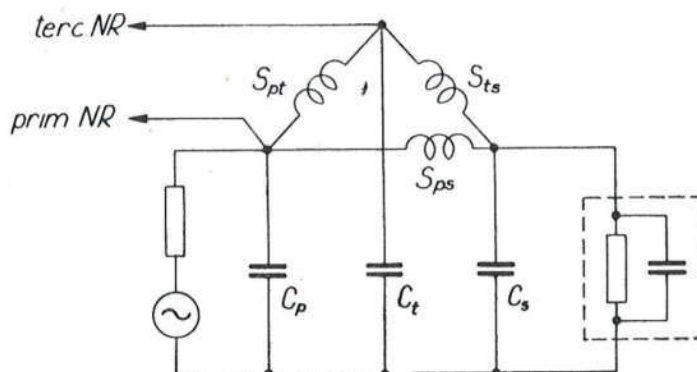
NR izlazni transformator mora biti, što se tiče širine frekventnog pojasa, visoke kvalitete. Pri tome treba imati na umu, da nadomjesna shema na sl. 156. prikazuje najjednostavniji slučaj. Kod visokokvalitetnih transformatora upotrebljavaju se namoti složeni od više međusobno uložених свитакa, što u shemi mnogo povećava broj parcijalnih induktiviteta i kapaciteta, te prema tome povećava i broj rezonantnih frekvencija. Zato sekundarna NR uz svoje prednosti ima i nedostatke, koje ćemo nabrojiti:

1. Uz isti faktor stabilnosti stupanj sekundarne NR, koji se može postići, mnogo je manji nego stupanj primarne NR.
2. Kod primjene jače sekundarne NR treba da je radi što manjeg zakreta faze unutarnji otpor izlaznog stupnja malen, a to znači da treba poduzeti posebne mjere, da se to postigne.
3. Općeniti uspjeh u konstrukciji pojačala ovisi o karakteristikama izlaznog transformatora, a ove karakteristike teško je kontrolirati kod projektiranja, a pogotovu u serijskoj proizvodnji.

Ako se radi o jačoj NR i o strogim zahtjevima u pogledu amplitudnog i faznog osiguranja od oscilacija, sekundarna NR ne dolazi u obzir. Čak i u slučaju, gdje se ona može primijeniti, mora se više vremena utrošiti na poduzimanje mjera radi sprečavanja oscilacija, nego li na poboljšavanje svojstava pojačala u prenošenom području.



Sl. 157. Tercijarna NR.



Sl. 158. Nadomjesna shema izlaznog transformatora s tercijskim svitkom, u vezi sa NR. Shema vrijedi za visoke frekvencije.

3. Tercijarna negativna reakcija. — Ova NR predstavlja kompromisno rješenje između primarne i sekundarne NR (sl. 157.). Tercijarnom NR također se korigiraju izobličenja, koja unosi transformator, a stabilnost od oscilacija je gotovo isto takva, kakvu pruža primarna NR. No da bi se tercijska NR mogla efikasno iskoristiti, treba da kod transformatora budu ispunjeni neki uvjeti. O čemu se radi, vidi se iz sl. 158. Na slici je prikazana nadomjesna shema transformatora s tercijskim svitkom, reducirana na primarnu stranu. Shema se odnosi na područje najviših frekvencija. Sa S_{ps} označen je rasipni induktivitet primara prema sekundaru, sa S_{pt} rasipni induktivitet primara

prema tercijaru, a sa S_{ts} rasipni induktivitet tercijaru prema sekundaru. Na shemi su naznačeni i kapaciteti pojedinih svitaka prema »zemlji«. Opteretnom otporu je paralelno spojen jedan kapacitet. To je kapacitet kabela, ili samog zvučnika, jer kod vrlo visokih frekvencija titrajna zavojnica zvučnika opterećuje transformator, osim sa svojim radnim otporom, pretežno vlastitim kapacitetom. Kao što se iz sheme odmah vidi, imat će točka, s koje se uzima napon za tercijernu NR, gotovo isti potencijal kao i točka, s koje se uzima napon za primarnu NR, samo u slučaju, ako je induktivitet S_{pt} vrlo malen prema induktivitetu S_{ts} . Tada će, naime, struja, koju opteretna impedancija uzima preko ove grane, izazvati mnogo manji pad napona na S_{pt} , nego na S_{ts} , te će napon za tercijernu NR biti praktički iste vrijednosti i faze, kao i napon primarne NR. Razumljivo je, da radi dobivanja stvarne vrijednosti tercijernog napona treba uzeti u obzir prijenosni odnos transformatora. Prikladnom konstrukcijom transformatora, to jest prikladnim međusobnim smještajem svitaka, mogu se u velikoj mjeri ispuniti zahtjevi, koje u pogledu rasipnih induktiviteta stavlja primjena tercijarne NR.

Tercijarna NR ima jedan ozbiljan nedostatak u poredbi sa sekundarnom NR. Zbog relativno velikog rasipnog induktiviteta između primara i sekundara nastaje na opteretnom otporu sekundara *gubitak napona visokih frekvencija, koji ne može biti kompenziran djelovanjem tercijarne NR*. Negativna reakcija smanjuje samo ono prigušno izobličenje, koje nastaje između ulaza reakcionog napona u pojačalo i svitka, s kojeg se uzima napon za NR.

4. Izlazni otpor izlaznog stupnja treba smanjiti! — Osim transformatora i drugi elementi u pojačalu zakreću fazu, iako je transformator u tom pogledu možda najveći krivac. Bilo da se radi o primarnoj, sekundarnoj ili terciarnoj NR, može se značajno smanjenje zakreta faze postići smanjenjem unutarnjeg otpora izlazne elektronke. To se može postići na više načina:

1. Primjenom triode, jer trioda u poredbi s pentodom ima vrlo malen unutarnji otpor. No trioda traži velik pobudni napon i ima malen stupanj djelovanja, te zato često nije prikladna.
2. Primjenom manje petlje NR unutar veće petlje NR, u koju je uključen izlazni transformator. Takvu manju petlju dobivamo, na primjer, reakcijom s anode izlazne elektronke na njezinu pobudnu rešetku ili na katodu prethodnog stupnja. No ovakva NR može u većoj mjeri povećati napon brujanja, do kojeg dolazi uslijed nedostatnog anodnog filtriranja, nego što ga sekundarna ili terciarna NR smanji. Bolji je način, da se izlazni stupanj izvede tako, da se jedan dio primara uvrsti u katodni krug, jer ovakva NR smanjuje brujanje.
3. Primjenom prigušivača parazitnih oscilacija. Ovakav serijski spoj otpornika i kondenzatora dodan paralelno primaru stvarno je paralelno dodan unutarnjem otporu elektronke, čime se efektivni unutarnji otpor izlaznog stupnja smanji na vrijednost, koja je jednaka vrijednosti paralelnog spoja unutarnjeg otpora elektronke i dodanog otpora, jer kapacitet kod visokih frekvencija predstavlja kratki spoj. Da bi ovaj serijski spoj bio što efikasniji, treba da mu je impedancija relativno malena. No tada se njegovo djelovanje proteže i u čujno područje smanjujući izlaznu snagu kod visokih frekvencija.

Kao što se vidi iz gornjeg izlaganja, ne može se ni jedna od transformatorskih NR preporučiti za svaki slučaj, koji dolazi u praksi. Koja će se

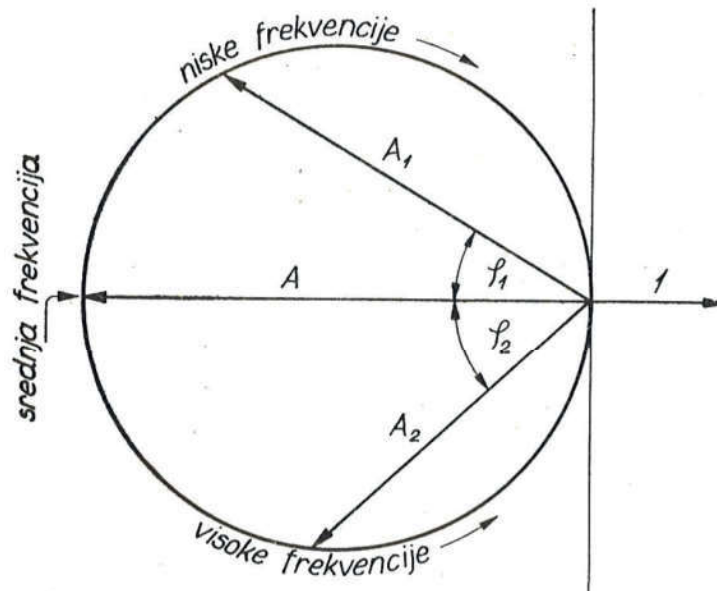
od njih primijeniti — primarna, sekundarna ili tercijarna — ovisi o tome, kakve se karakteristike od pojačala traže, koliki se stupanj stabilnosti želi osigurati, i na koncu o tome, kolika je dopustiva cijena pojačala.

5. Kod vrlo visokih frekvencija transformator se ponaša kao element s raspodijeljenim konstantama. — U području vrlo visokih frekvencija transformator ne predstavlja sklop s takozvanim minimalnim faznim zakretom, te se prema tome na pojačalo s transformatorom ne mogu primijeniti principi, koje smo upoznali u vezi s idealnom prigušnom karakteristikom i maksimalnom NR. Zato u slučaju, ako se radi o jakoj NR, a u petlji NR se nalazi transformator, treba snimati polarni dijagram reakcionog napona, te iz dijagrama zaključiti, kolika se NR može primijeniti, i kakve su prilike u vezi s faznim osiguranjem. O polarnom dijagramu bit će govora u slijedećem poglavlju.

8. Polarni dijagram pojačala

Način, koji smo dosada primjenjivali, da bismo kod pojačala prikazali ovisnost amplitude i faze o frekvenciji, nije uvijek pogodan. Naročito u vezi sa stabilnošću pojačala ne daju dva dijagrama — jedan za amplitudu, a drugi za fazu — onu preglednost, koju bi mogao dati jedan dijagram prikazujući istodobno i amplitudne i fazne odnose. No takav dijagram postoji! To je *polarni dijagram*.

1. Jednostepeno pojačalo. — Na sl. 159. se vidi kako se po amplitudi i fazi mijenja vektor izlaznog napona kod jednostepenog triodnog pojačala. Kod frekvencija blizu nule vektor je prema vektoru kod srednje frekvencije¹

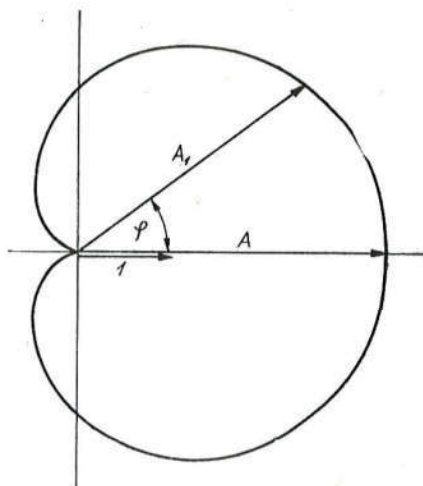


Sl. 159. Polarni dijagram jednostepenog pojačala.

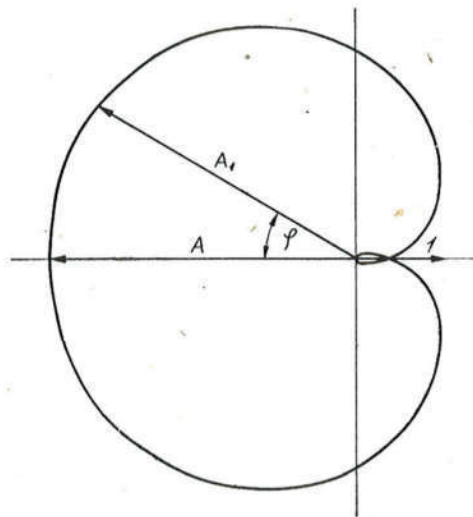
¹ »Srednjom frekvencijom« ovdje ćemo nazvati onu frekvenciju, kod koje vektor izlaznog napona pada u pravac ulaznog napona. Kod jednostepenog pojačala (ili općenito kod pojačala s neparnim brojem stupnjeva) to je frekvencija, kod koje je izlazni napon točno u protufazi ulaznom naponu (vektor A je prema vektoru 1 zaokrenut za 180°).

pomaknut za blizu 90° i veličina mu je blizu nule. S porastom frekvencije fazni kut φ se smanjuje, a dužina vektora povećava. Pri tome vrh vektora putuje po polukružnici, koja je opisana nad vektorom kod srednje frekvencije kao promjerom. Za visoke frekvencije vrijedi slično. I ovdje vrh vektora izlaznog napona putuje po polukružnici, koja se nastavlja na onu prvu. Kod vrlo visokih frekvencija vektor izlaznog napona zatvara s vektorom kod srednje frekvencije kut od blizu 90° , i ima dužinu blizu nule. Kao što vidimo vektor izlaznog napona A vrti se kod mijenjanja frekvencije od 0 do ∞ oko jedne točke, oko pola, opisujući kut od 180° . Polarni dijagram jednostepenog triodnog pojačala je, dakle, kružnica. Svakoj frekvenciji odgovara jedna točka kružnice. Dužina vektora, koji ima svoj početak u polu, a završetak u jednoj točki na kružnici, odgovara pojačanju pojačala kod dotične frekvencije. Kut, što ga ovaj vektor zatvara s vektorom kod srednje frekvencije, predstavlja fazni kut. Kako sama elektronka zakreće fazu za 180° , to je za toliko vektor napona na rešetki 1 zakrenut prema vektoru izlaznog napona A kod srednje frekvencije.

2. Dvostepeno pojačalo. — Kod dvostepenog pojačala pojačanje je kod svake frekvencije veće, nego kod jednostepenog pojačala, ali i fazni kut. Dok se pojačanje jednog stupnja množi s pojačanjem drugog stupnja, dotle se fazni kutovi zbrajaju. Ako se radi o posve identičnim stupnjevima, fazni kut dvostepenog pojačala dobiva se udvostručivanjem dotičnog faznog kuta jednog stupnja. U ovom slučaju fazni zakret izlaznog napona raste dvostruko brže nego kod jednog stupnja. Iz toga slijedi, da će fazni kut kod frekvencije nula biti $2 \times 90^\circ = 180^\circ$, a isto toliko kod beskonačno visoke frekvencije. Polarni dijagram dvostepenog triodnog pojačala s identičnim stupnjevima ima oblik bubrega, kao što vidimo na sl. 160. Ovdje je ulazni napon 1 u fazi s



Sl. 160. Polarni dijagram dvostepenog pojačala.

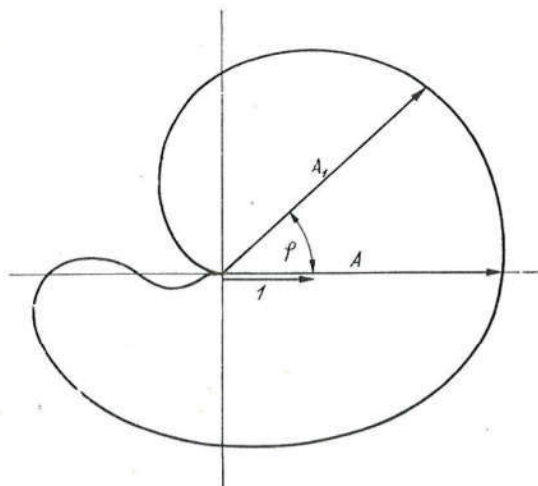


Sl. 161. Polarni dijagram trostepenog pojačala.

izlaznim naponom, kod srednje frekvencije, jer dvije elektronke zakreću fazu za $2 \times 180^\circ = 360^\circ$.

3. Trostepeno pojačalo. — Kod trostepenog pojačala se fazni kut, uz identične stupnjeve, u odnosu na fazni kut kod jednog stupnja, utrostručuje. Prema tome će kod jedne i druge granične frekvencije (frekvencije

0 i ∞) fazni kut izlaznog napona biti 270° . Polarni dijagram trostepenog triodnog pojačala s identičnim stupnjevima vidimo na sl. 161. Budući da u ovom slučaju same elektronke zakreću fazu za $3 \times 180^\circ = 360^\circ + 180^\circ$, to je izlazni napon A kod srednje frekvencije prema ulaznom naponu 1 u protufazi.



Sl. 162. Opći oblik polarnog dijagrama pojačala.

4. Opći oblik polarnog dijagrama. — U opisanim slučajevima pretpostavili smo, da su kod višestepenih pojačala stupnjevi posve identični. Zato su polarni dijagrami pravilni i simetrični. Ako stupnjevi nisu identični, i ako se još k tome na izlazu pojačala nalazi transformator, onda polarni dijagram ne će biti pravilna oblika, već možda onakav, kakav vidimo na sl. 162.

Kad pojačalo ima izlazni transformator, može izlazni napon prema ulaznom naponu biti u fazi i u protufazi, ovisno o tome, koji se kraj sekundara uzemlji. U vezi sa NR treba sekundar tako uzemljiti, da napon neuzemljenog kraja prema zemlji bude u protufazi prema naponu na ulaznoj rešetki.

9. Stabilnost pojačala i polarni dijagram

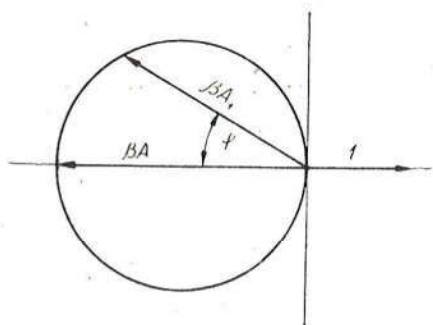
Malo odulje razmatranje o polarnom dijagramu, koje smo proveli u prethodnom odsjeku, korisno će nam poslužiti u proučavanju jednog drugog polarnog dijagrama, koji se može dobiti direktno iz onog prvog. Radi se o *polarnom dijagramu reakcionog napona ili Nyquist-ovu dijagramu*.

Pretpostavit ćemo da je naponski djelitelj, koji izlazni napon pojačala smanjuje na vrijednost potrebnu za NR, sastavljen od radnih otpora, da je dakle faktor β neovisan o frekvenciji, odnosno, da djelitelj napona sam po sebi ne zakreće fazu. U tom slučaju se polarni dijagram može lako dobiti na taj način, da se iznos vektora A kod svake frekvencije pomnoži s razlomkom β . Time polarni dijagram ne promijeni oblik, samo se krivulja stegne. Promotrimo polarne dijagrame reakcionog napona kod onih slučajeva, koje smo maločas imali.

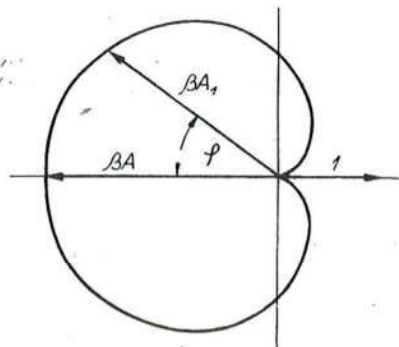
1. Jednostepeno pojačalo. — O polarnom dijagramu reakcionog napona kod jednostepenog pojačala nema mnogo da se kaže (sl. 163.). Kružnica je

ovdje manja, a vektor napona na rešetki 1 u odnosu na vektor βA kod srednje frekvencije ima isti smjer kao vektor A na sl. 159., jer kod NR ulazni i reakcioni napon moraju biti u protufazi.

2. Dvostepeno pojačalo. — Kod dvostepenog pojačala stvar je nešto drugačija. Da bi vektori 1 i βA kod srednje frekvencije bili protufazni, treba dijagram zaokrenuti na lijevu stranu. U tome je u ovom slučaju razlika između A -dijagrama i βA -dijagrama (sl. 164.).

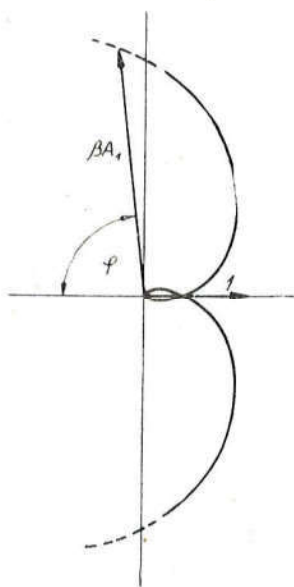


Sl. 163. Polarni dijagram reakcionog napona kod jednostepenog pojačala.

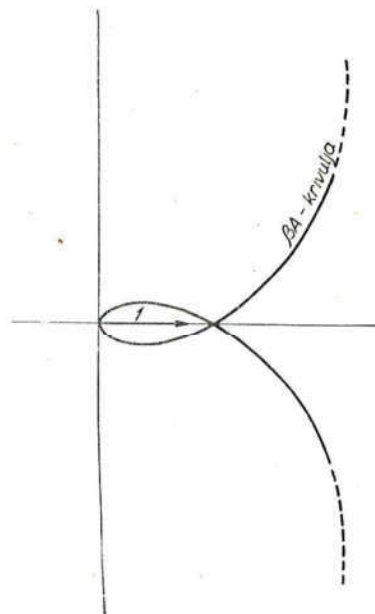


Sl. 164. Polarni dijagram reakcionog napona kod dvostepenog pojačala.

3. Trostepeno pojačalo. — Posebno će za nas biti zanimljiv slučaj trostepenog pojačala. I ovdje je A -dijagram posve sličan βA -dijagramu, kao i kod jednostepenog pojačala. Samo ovdje imamo nešto posebno. Iz. sl. 165. vidimo, da krivulja reakcionog napona presjeca vektor ulaznog napona 1 , i to dva



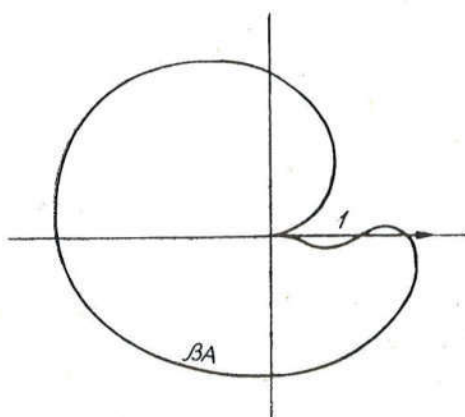
Sl. 165. Dio polarnog dijagrama reakcionog napona trostepenog pojačala. U ovom slučaju dijagram siječe vektor napona ulazne rešetke.



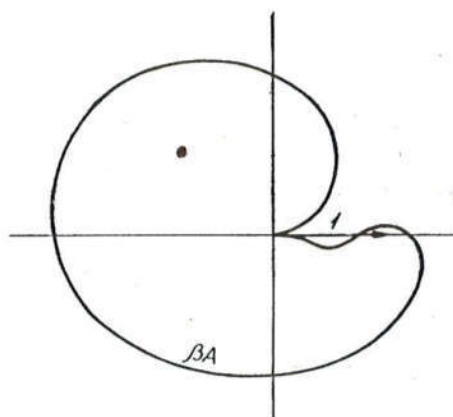
Sl. 166. Polarni dijagram reakcionog napona trostepenog pojačala, koji prikazuje slučaj, u kojem dolazi do oscilacija kod dviju frekvencija.

puta. To znači, da kod stanovitih dviju frekvencija reakcioni napon dolazi točno u fazu s ulaznim naponom. No dok krivulja vektor presjeca, stvar je u redu, jer je tada dotični reakcioni napon manji od napona na ulaznoj rešetki, te do oscilacija ne može doći. Ali ako se NR pojača, nastupi slučaj prikazan na sl. 166., gdje krivulja obilazi vektor, i prilike su posve drugačije. U tom slučaju je kod dviju frekvencija reakcioni napon veći od ulaznog, a budući da je s njim u fazi, to dolazi do oscilacija.

4. Opći oblik polarnog dijagrama reakcionog napona. — Sve, što je gore rečeno, vrijedi i za pojačalo, koje ima polarni dijagram nepravilnog oblika. Ako krivulja reakcionog napona siječe vektor napona 1 , pojačalo je stabilno (sl. 167.). Ako pak prolazi kroz vrh vektora 1 , ili ga zaobilazi, pojačalo ne će biti stabilno, ono će oscilirati (sl. 168.).



Sl. 167. Opći oblik polarnog dijagrama reakcionog napona. Dijagram siječe vektor napona ulazne rešetke, iz čega slijedi, da je pojačalo u NR stabilno.



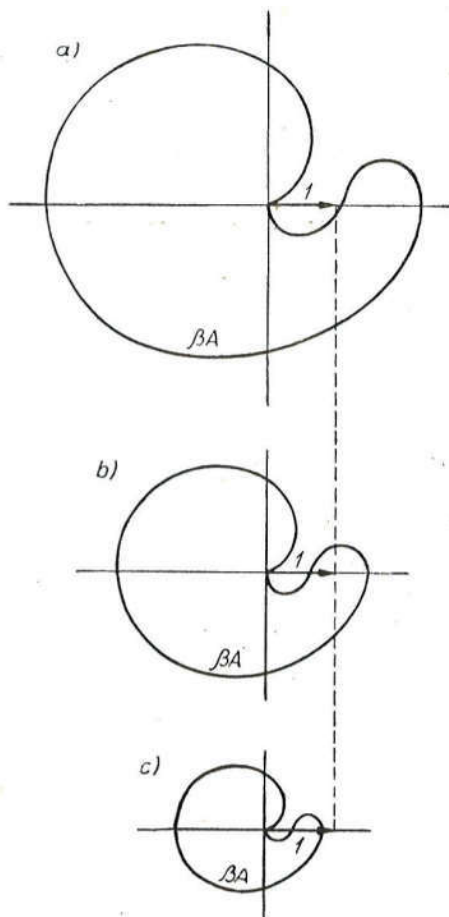
Sl. 168. Ovdje polarni dijagram obuhvaća vrh vektora napona rešetke, zbog čega dotično pojačalo ne će biti stabilno, ono će oscilirati.

5. Uvjetna stabilnost. — Postoji slučaj, u kojem je reakcioni napon veći od ulaznog, te, iako je s njim u fazi, ne dolazi do oscilacija. Takav slučaj vidimo na sl. 169a. Vrh vektora napona na rešetki ovdje leži *izvan plohe* dijagrama, a to je uvjet da pojačalo bude stabilno. No ako se pojačanje pojačala smanji, tako da vrh vektora 1 padne u plohu dijagrama (sl. 169b), nastanu oscilacije. Smanjujući i dalje pojačanje dijagram će se toliko stegnuti, da će vrh vektora izaći na drugu stranu izvan plohe dijagrama, te će opet nastupiti stabilnost (sl. 169c).

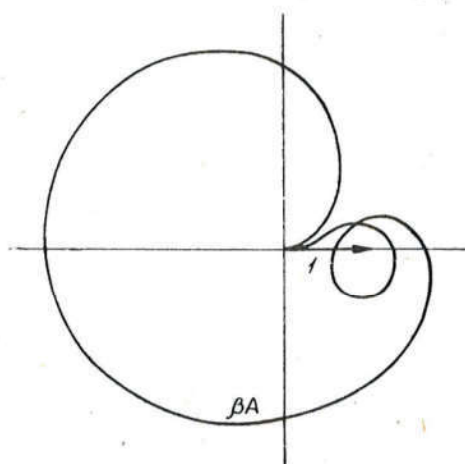
Pojačalo, kod kojeg dijagram reakcionog napona ima oblik kao na sl. 169a, ostaje stabilno samo uz uvjet, da se za vrijeme pogona pojačanje ne smanji na vrijednost, koja je potrebna za oscilacije. Kod pojačala s dijagramom, kao na sl. 169c, smanjenje pojačanja ne može dovesti do oscilacija, te je ono u pogonu uvijek stabilno. Ova stabilnost je *bezuovjetna* ili *stabilnost prvoga reda*. Naprotiv, pojačalo s dijagramom kao na sl. 169a stabilno je *uvjetno*. To je *stabilnost drugoga reda*. Ovakvo pojačalo može postati nestabilno, kad se elektronkama starenjem smanji pojačanje. No još je nezgod-

nije svojstvo ovakvog pojačala u tome, što oscilacije mogu nastati neposredno poslije ukapčanja pojačala na električnu mrežu. Za vrijeme procesa užarivanja katoda elektronke imaju manje pojačanje, te uvjet za oscilacije može biti ispunjen. Ako se ove oscilacije prekinu, na primjer, kratkim spajanjem jednog stupnja, pojačalo dalje radi stabilno. Svim je razumljivo, da pojačalo s ovakvim svojstvima nije prikladno za praktičku upotrebu.

Još ćemo spomenuti slučaj, u kojem polarni dijagram reakcionog napona ima oblik, kakav vidimo na sl. 170. Ovdje je reakcioni napon kod triju frekvencija u fazi s naponom na rešetki, a kod dviju od njih je veći od napona na rešetki. Budući da u ovom dijagramu krivulja ne mimoilazi vrh vektora na-



Sl. 169. a) Polarni dijagram, koji prikazuje uvjetnu stabilnost. b) Smanjivanjem pojačanja u pojačalu dijagram pod a) se stegne, te nastupi nestabilnost, jer vrh vektora uđe u plohu dijagrama. c) Daljnjim smanjivanjem pojačanja u pojačalu dijagram se još više stegne. Kako je vrh vektora izašao iz plohe dijagrama, ponovno je nastupila stabilnost.

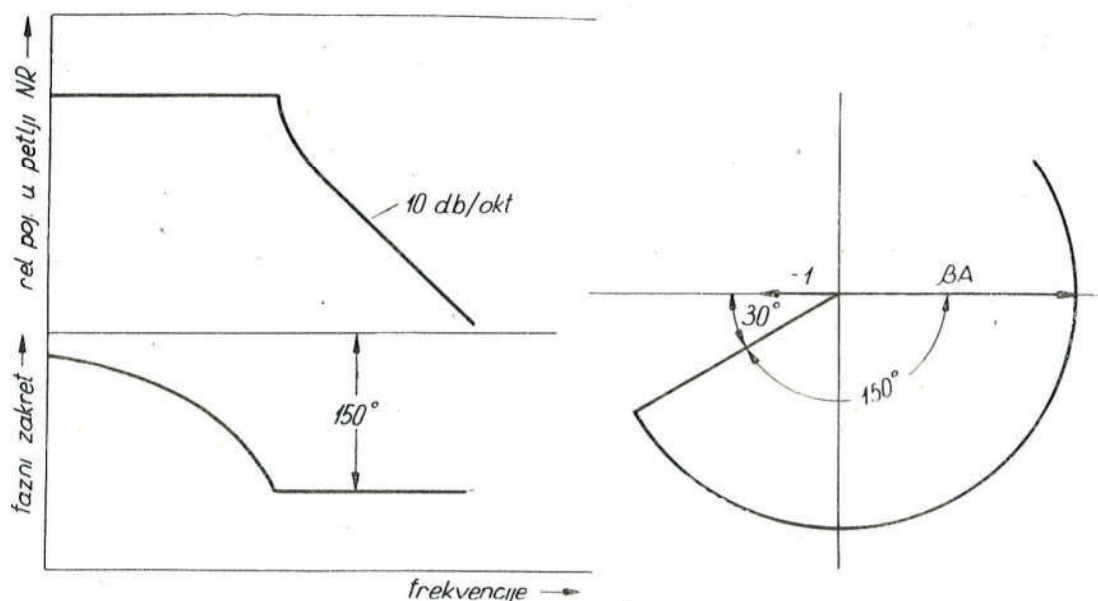


Sl. 170. Polarni dijagram s petljom oko vrha vektora, koji prikazuje napon ulazne rešetke.

pona na rešetki, nego ga zatvara petljom, tako da se on nalazi u plohi dijagrama, to stabilnosti nema. Zato će na jednoj od dviju frekvencija, kod kojih je reakcioni napon veći od napona na ulaznoj rešetki, pojačalo oscilirati.

10. Optimalni oblik polarnog dijagrama

1. Polarni dijagram idealne naponske karakteristike. — Polarni dijagram idealnog oblika bit će svakako onaj, koji prikazuje idealne amplitudne i fazne odnose. Najprije ćemo vidjeti, kako izgleda polarni dijagram kod one idealne naponske karakteristike, koja ima konstantan konačan nagib od 10 decibela po oktavi. Iz sl. 171. vidimo, da je u ovom slučaju polarni dijagram kružnog oblika. Sve do najviše frekvencije, koju treba prenijeti, pojačanje je konstantno, dok fazni kut postepeno raste, što znači da je vektor reakcionog



Sl. 171. Polarni dijagram idealne prigušne karakteristike s krajnjim nagibom od 10 decibela po oktavi.

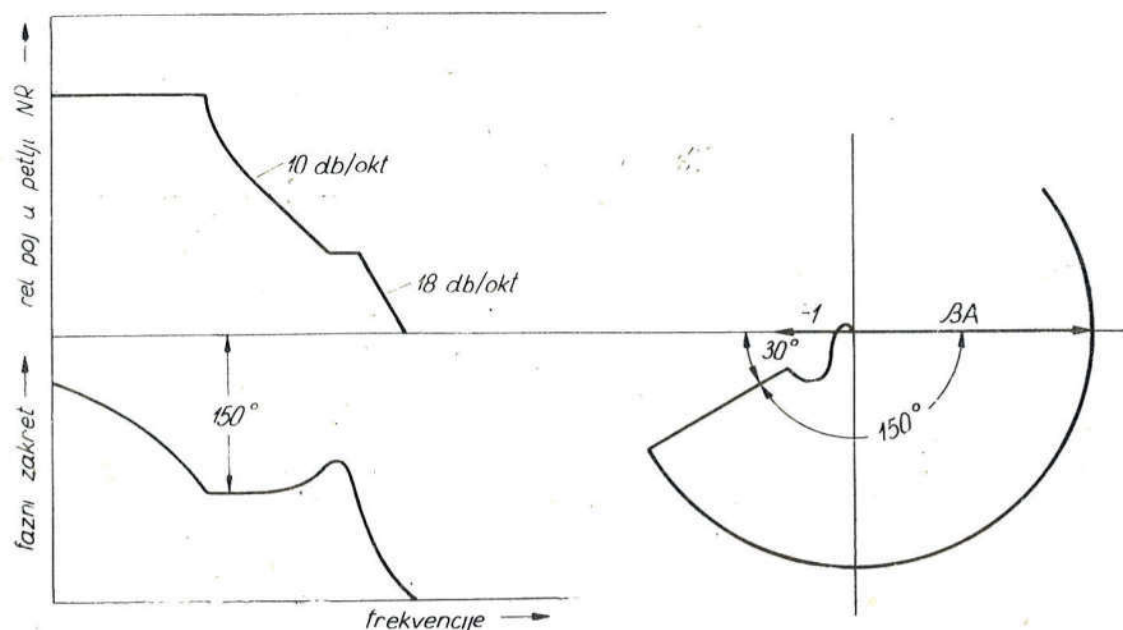
napona radijus kružnice, koji rotira. Od dotične najviše frekvencije pojačanje postepeno pada, a fazni kut ostaje nepromijenjen. Zato je ovaj dio dijagrama pravac, koji spaja kraj kružnog luka sa središtem.

Polarni dijagrami se obično crtaju tako, da vektor βA -napona za srednje frekvencije pada u pozitivni smjer horizontalne osi. Prema tome vektor napona na rešetki 1 dolazi na suprotnu stranu i postaje vektor -1 . Tako je crtan dijagram na sl. 171. za razliku od načina, kako smo polarne dijagrame crtali dosada.

2. Polarni dijagram stepeničaste idealne karakteristike. — I kod stepeničaste idealne karakteristike polarni dijagram je kružnog oblika, samo što u ovom slučaju završni pravac u blizini središta prelazi u krivulju, koja ima oblik slova S. Kako na sl. 172. krajnji nagib iznosi 18 decibela po oktavi, to se polarni dijagram završava s konačnim faznim kutom od 270° .

3. Opći oblik polarnog dijagrama i uvjeti stabilnosti. — U općenitom slučaju polarni dijagram ne će imati kružni oblik, niti će imati oštre prelaze. Takav dijagram vidimo na sl. 173. Ovaj će nam dijagram poslužiti, da još jednom izložimo pojam amplitudnog i faznog osiguranja, za što je upravo polarni dijagram naročito prikladan. Ako amplitudno osiguranje treba da

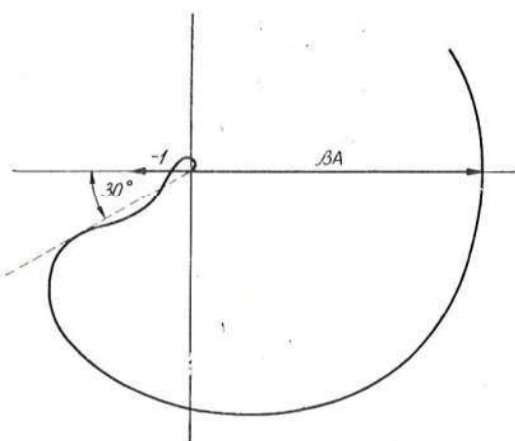
iznosi najmanje 6 decibela, onda to znači, da dijagram ne smije sjeći vektor -1 iznad polovine, nego u samoj polovini ili ispod ove vrijednosti. Kod amplitudnog osiguranja od 10 decibela presjecište je udaljeno od središta za jednu trećinu dužine vektora -1 . Uz fazno osiguranje od 30° ne smije ni jedna



Sl. 172. Polarni dijagram idealne stepeničaste prigušne karakteristike.

točka dijagrama iznad luka s radijusom -1 prelaziti pravac, koji s horizontalnom osi zatvara kut od 30° .

Razmatrajući problem maksimalne NR vidjeli smo, da o veličini amplitudnog i faznog osiguranja ovisi, koliku ćemo najveću NR moći primijeniti.

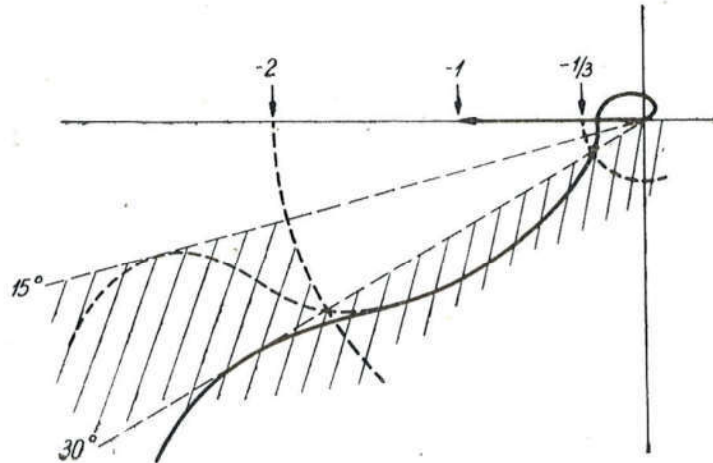


Sl. 173. Polarni dijagram s faznim osiguranjem od 30° .

Polarni dijagram nam pruža mogućnost, da uvidimo, kako je zahtjev za fazno osiguranje od 30° za sve točke dijagrama iznad luka s radijusom 1 prestrog. Ako se zamjenom neke elektronke ili kojeg drugog elementa u pojačalu dijagramu promijeni oblik u onaj, kako je označeno crktano na sl. 174., ne će biti ugrožena stabilnost pojačala. Ova kva promjena dijagrama može u najgorem slučaju dovesti do uvjetne stabilnosti. Budući da smanjenje faznog osiguranja omogućuje da se pojača NR, to ćemo dopustiti da za βA veće od 2 (6 db) fazno osiguranje iznosi manje. Ako je potrebno može će ići i do faznog osiguranja od 15° .

4. Određivanje maksimalne negativne reakcije iz polarnog dijagrama izlaznog napona. — Da se nađe, kolika se najveća NR može primijeniti, nije potrebno imati na raspolaganju polarni dijagram reakcionog napona, već se to može odrediti i iz polarnog dijagrama izlaznog napona. To je dakako mo-

guće učiniti uz uvjet, da je A -dijagram posve sličan βA -dijagramu, to jest da u reakcionoj grani ne dolazi do zakreta faze. Ovaj problem smo zapravo već riješili u poglavlju 5. ove glave, gdje smo izložili, kako se iz A -karakteristike poznavajući točku, u kojoj dolazi do zakreta faze od 180° , može naći, kolika se maksimalna NR može u dotičnom slučaju primijeniti. No ne će ništa smetati, ako ovaj način ponovo iznesemo u vezi s polarnim dijagramom.



Sl. 174. Za reakcione napone, koji su veći od dvostrukog napona ulazne rešetke, može se fazno osiguranje smanjiti na 15° .

Pojačalo je na granici stabilnosti uz onu NR, kod koje je reakcioni napon s faznim kutom od 180° jednak naponu na ulaznoj rešetki. Označimo li pojačanje, koje pojačalo ima kod faznog zakreta izlaznog napona za 180° , sa A_{180° , onda gornji uvjet možemo ovako napisati:

$$\beta A_{180^\circ} = 1 \quad (61)$$

iz čega slijedi da je:

$$\beta = \frac{1}{A_{180^\circ}} \quad (63)$$

Ako je stupanj NR dovoljno velik, onda će kod srednjih frekvencija reakcioni napon βA biti mnogo veći od napona na rešetki 1, tako da se u izrazu $(1 + \beta A)$ član 1 može zanemariti. Iz toga slijedi da je stupanj NR:

$$p = \frac{A}{A'} = \frac{1 + \beta A}{1} \approx \beta A = \frac{A}{A_{180^\circ}} \quad (62)$$

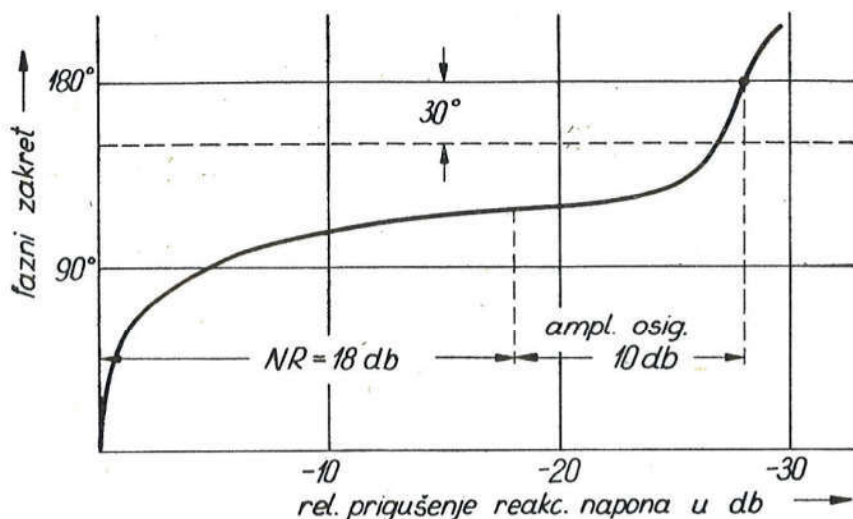
Dakle: odnos pojačanja kod srednjih frekvencija prema pojačanju koje pojačalo ima kod faznog zakreta od 180° , daje maksimalnu NR, koja se može primijeniti uz dovođenje pojačala na prag oscilacija. Ako se pojačanje naznačuje u decibelima, onda maksimalnu NR daje razlika u decibelima između pojačanja kod srednjih frekvencija i pojačanja kod faznog kuta od 180° :

$$p(\text{db}) = A(\text{db}) - A_{180^\circ}(\text{db}) \quad (63a)$$

Pogonska NR treba, dakako, da bude manja, kako to odgovara potrebnom amplitudnom osiguranju. Jedino još iz dijagrama treba vidjeti, kako stoji

s faznim osiguranjem. Ukoliko je nedovoljno, treba primijeniti korekcijske elemente, i radi kontrole ponovo izvršiti snimanje dijagrama.

Katkad je prikladno, da se odnos između pojačanja i faznog kuta prikaže u pravokutnom sistemu. Takav dijagram vidimo na sl. 175.



Sl. 175. Dijagram, koji prikazuje relativno pojačanje i fazni zakret u pravokutnom sistemu.

11. Negativna reakcija u tehnici velikih odašiljača

1. Razina izobličenja i smetnji kod velikih odašiljača. — Kod velikih amplitudno-moduliranih odašiljača najviše se primjenjuje anodna modulacija. Uz ovu modulaciju treba bez primjene NR, i to kod srednjih frekvencija, gdje su uzrok harmoničkom izobličenju elektronke, računati s faktorom izobličenja od 10% (20 db).¹ Kod niskih frekvencija, gdje svoj prilog izobličenju dodaje transformator, faktor izobličenja se povećava i na 17% (15 db).

Kod velikih odašiljača poseban problem je brujanje, koje nastaje zbog žarenja elektronke izmjeničnom strujom. Brujanjem odašiljač može biti moduliran do 1% (—40 db), pa čak i do 2% (—35 db).

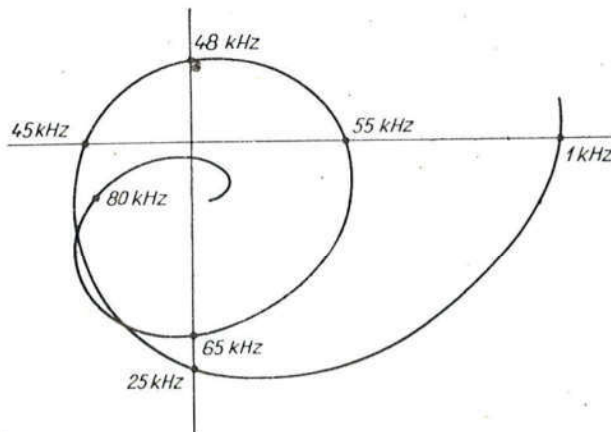
Danas se u pogledu harmoničkog izobličenja i razine brujanja postavljaju na radiodifuzne amplitudno modulirane odašiljače veliki zahtjevi. Tako faktor izobličenja ne smije biti veći od 2% (35 db), a brujanje ne smije iznositi više od 0,2% (—55 db) od maksimalnog signala. Kako konstruktor mora uvijek uzeti u obzir stanoviti faktor osiguranja, to će on ove zahtjeve povećati, te će od svog uređaja tražiti, da faktor izobličenja ne prelazi 1% (40 db), a brujanje 0,1% (—60 db). Ukoliko ovaj rezultat treba postići pomoću NR, što se u praksi normalno i čini, to s obzirom na gornje podatke izlazi, da kod srednjih frekvencija NR treba da iznosi oko 20 db, a kod niskih frekvencija da se poveća i na 25 db.

Izobličenje i brujanje ne dolazi samo iz modulatora. Značajan dio ovih smetnji nastaje također u izlaznom visokofrekventnom stupnju. To postavlja

¹ O izražavanju izobličenja u decibelima vidi prilog na kraju knjige.

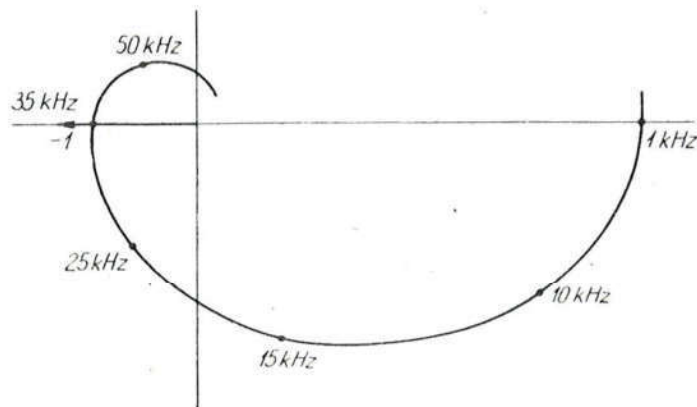
zahtjev, da se NR protegne i na ovaj stupanj odašiljača, to jest, da se kao reakcioni napon upotrebi demodulirani signal. Time se dobiva *opća* ili *globalna NR*.

2. Sekundarna petlja negativne reakcije. — Kod odašiljača nije lako dobiti povoljan polarni dijagram za jaču NR. Glavni krivac za nepovoljan dijagram je modulacioni transformator. Dijagram jednog takvog transformatora vidimo na sl. 176.



Sl. 176. Polarni dijagram jednog velikog modulacionog transformatora.

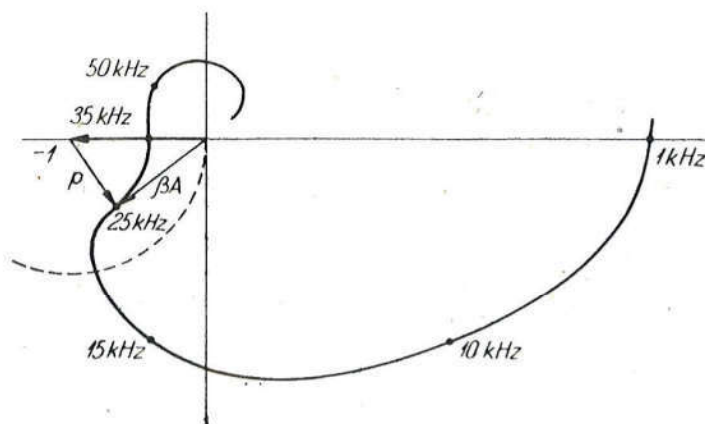
Kako se u petlju NR uključuju i drugi zakretači faze to će do zakreta od 180° doći već kod niskih ultrazvučnih frekvencija, kao što se vidi iz sl. 177. Naponi tih frekvencija ne će biti znatnije oslabljeni, te se ne će moći primijeniti dovoljno jaka NR. Slabljenje ovih napona može se postići, na



Sl. 177. Polarni dijagram jednog modulacionog pojačala bez primjene korektora. Do zakreta faze od 180° ovdje dolazi već kod frekvencije od 35 kHz, i to uz veliki reakcioni napon, te se ne može primijeniti jača NR.

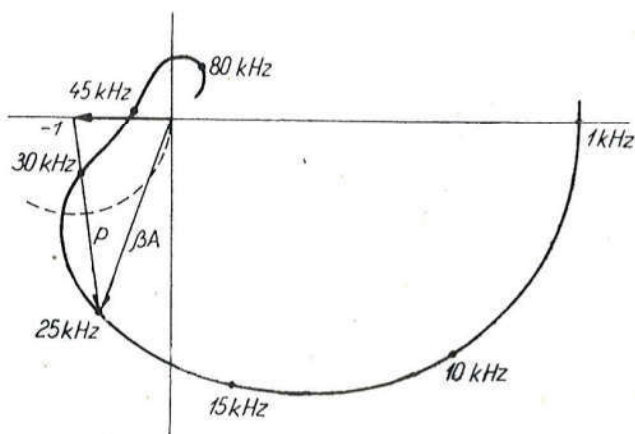
primjer, tako da se u petlju NR uvrsti serijski titrajni krug. Time se, što se tiče stupnja NR dobiva povoljniji dijagram (sl. 178.), ali se u vezi s izobličenjem pojavljuje nova okolnost. Iz slike vidimo da zbroj vektora 1 s vektorom reakcionog napona βA , koji pripada frekvenciji 25 kHz,

daje vektor ulaznog napona p , koji je manji od polumjera kruga, dakle je manji od napona na ulaznoj rešetki. To znači, da se kod te frekvencije ne radi o negativnoj, već o pozitivnoj reakciji. Iako frekvencija od 25 kHz pada izvan akustičkog područja, ipak je ona važna, jer je to frekvencija petog harmonika od 5 kHz, a također blizina trećeg harmonika od 8 kHz.



Sl. 178. Primjenom korektora polarni dijagram, se s obzirom na amplitudno osiguranje poboljša, ali do pozitivne reakcije dolazi kod suviše niskih ultrazvučnih frekvencija, što povećava harmoničko izobličenje u tonfrekventnom području.

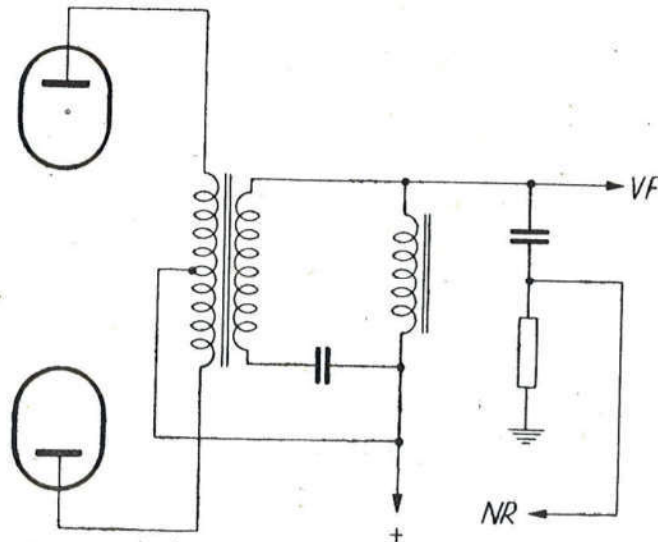
Da se, dakle, izobličenje kod viših zvučnih frekvencija ne bi povećavalo, treba niže ultrazvučne frekvencije pomaknuti izvan kruga. To se može učiniti pomoću sekundarne petlje NR. Ako se, naime, prvotni reakcioni napon pomiče s naponom sekundarne petlje, koji je uzet s prikladnog mjesta, dobiva se dijagram skoro istog oblika, kao prijašnji, samo je raspored frekvencija drugačiji, kao što se vidi na sl. 179. Ovdje je vektor ulaznog napona za frek-



Sl. 179. Dodavanjem napona iz sekundarne petlje NR polarni dijagram se poboljšava u tom smislu, što uz isto amplitudno osiguranje ne dolazi kod niskih ultrazvučnih frekvencija do pozitivne reakcije.

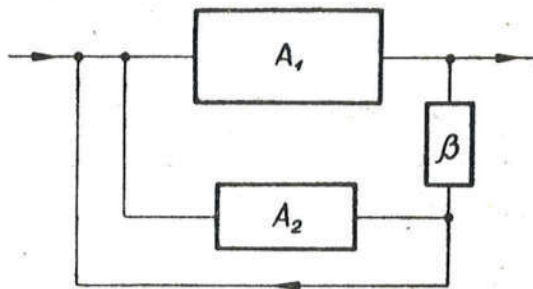
venciju od 25 kHz duži od radijusa kruga, što znači, da će napon dotične frekvencije biti oslabljen. Jedan primjer dobivanja napona za sekundarnu petlju NR vidi se na sl. 180.

3. Pomoćno pojačalo. — Ima slučajeva, kada se ni pomoću sekundarne petlje ne može dobiti dijagram, koji bi omogućivao dovoljno jaku NR. No, i u takvim slučajevima ima pomoći, i to primjenom *pomoćnog pojačala*.



Sl. 180. Jedan od načina za dobivanje napona za sekundarnu petlju NR.

Pomoćno pojačalo ima ulaz zajednički s ulazom glavnog pojačala. Izlazni naponi obaju pojačala međusobno se miješaju, tako da je reakcioni napon proporcionalan vektorskoj sumi ovih dvaju napona. Ako sa A_1 , kao na sl. 181., označimo pojačanje glavnog pojačala, a sa A_2 pojačanje pomoćnog poja-

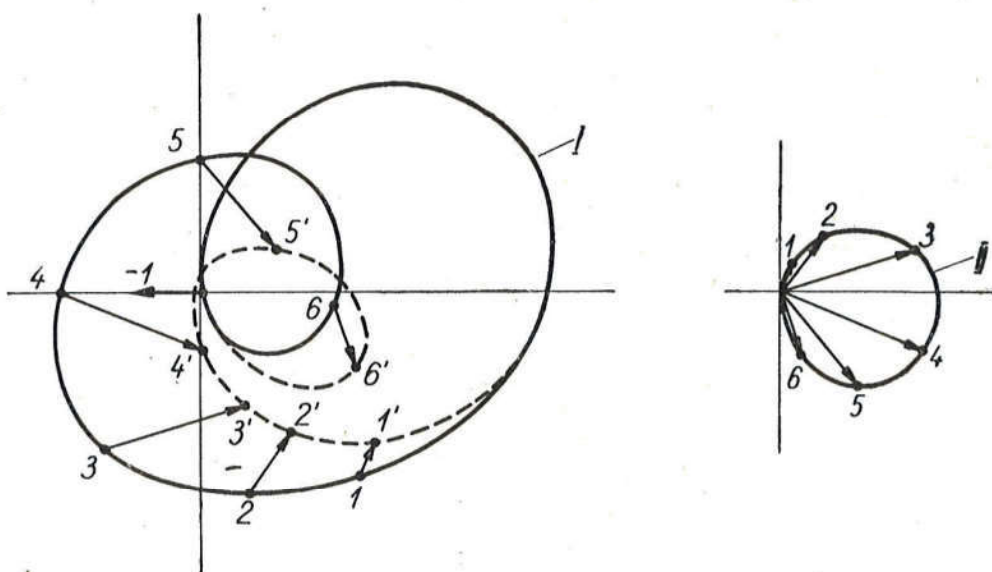


Sl. 181. Blok-shema, koja prikazuje, kako se glavnom pojačalu A_1 dodaje pomoćno pojačalo A_2 .

čala, onda će pojačanje glavnog pojačala uz primjenu NR biti $(1 + \beta A_1 + A_2)$ puta manje. No samim tim ne dobiva se ništa posebno. Tek kad se pomoćnom pojačalu dadu posebna svojstva, dolazi ono do punog izražaja. Da bi se mogla primijeniti jača NR, treba pomoćno pojačalo da djeluje tek kod onih frekvencija, kod kojih postoji opasnost od oscilacija. Neka glavno pojačalo ima dija-

gram, kakav je na sl. 182. označen sa I, a pomoćno pojačalo dijagram označen sa II. Zbroj obaju dijagrama daje dijagram, koji je na slici naznačen crtkano. Kao što vidimo, ovdje je pojačanje kod frekvencije, kod koje nastaje zakret za 180° , znatno manje nego prije, te je moguća primjena jače NR.

Pomoćno pojačalo se može vrlo efikasno iskoristiti i za smanjenje parazitnih napona, to jest napona harmonika i napona brujanja. U frekventnom području, u kojem se nalaze ovi naponi, pomoćno pojačalo treba da bude u pozitivnoj reakciji, a pojačanje treba da mu je manje od 1. Na ulazu oba pojačala djeluje reakcioni napon glavnog pojačala uvećan za reakcioni



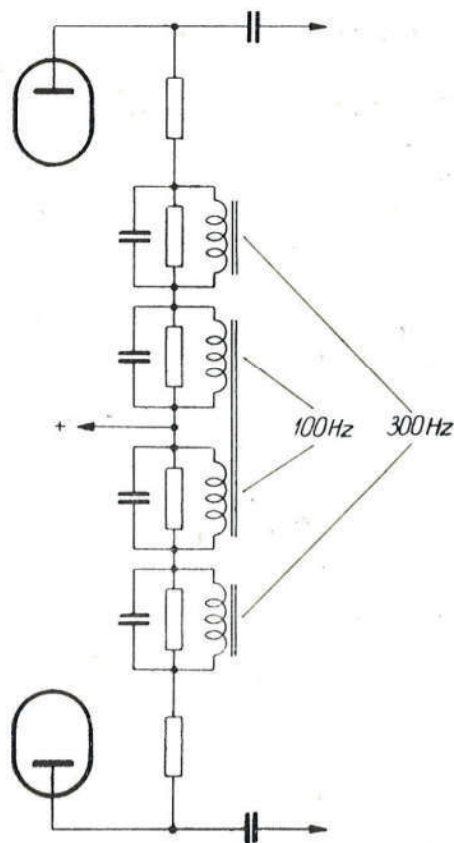
Sl. 182. Polarni dijagram I glavnog pojačala zajedno s polarnim dijagramom II pomoćnog pojačala daje novi polarni dijagram naznačen crtkano, koji je s obzirom na amplitudno osiguranje mnogo povoljniji nego dijagram I.

(izlazni) napon pomoćnog pojačala. Prema tome je napon, koji u glavnom pojačalu djeluje protufazno parazitnom naponu, sada veći nego u slučaju bez pomoćnog pojačala, te zbog toga dolazi do povećanog smanjenja harmonika i napona brujanja. Što je pojačanje pomoćnog pojačala bliže jedinici, to manji je udio reakcionog napona glavnog pojačala u ukupnom naponu na ulazu pomoćnog pojačala, te je utoliko izlazni parazitni napon manji.

Iz gornjeg izlaganja izlazi, da pomoćno pojačalo, koje istodobno smanjuje parazitne napone i sprečava samooscilacije, mora imati obrnutu faznu karakteristiku od glavnog pojačala: da bi se smanjili parazitni naponi, pomoćno pojačalo mora u dotičnom području frekvencija biti u pozitivnoj reakciji. Kad kod ekstremnih frekvencija u glavnom pojačalu dolazi do pozitivne reakcije, pomoćno pojačalo, da bi se dobio suprotan napon, treba da bude u negativnoj reakciji.

4. Smanjivanje brujanja izdizanjem pojačanja. — Ako se radi o parazitnim naponima sasvim određenih frekvencija, kao što su kod odašiljača, na

primjer, naponi brujanja s frekvencijom od 100 i 300 Hz, onda se oni mogu prigušiti i tako, da se pojačanje kod dotičnih frekvencija izdigne, i to na ovaj način:



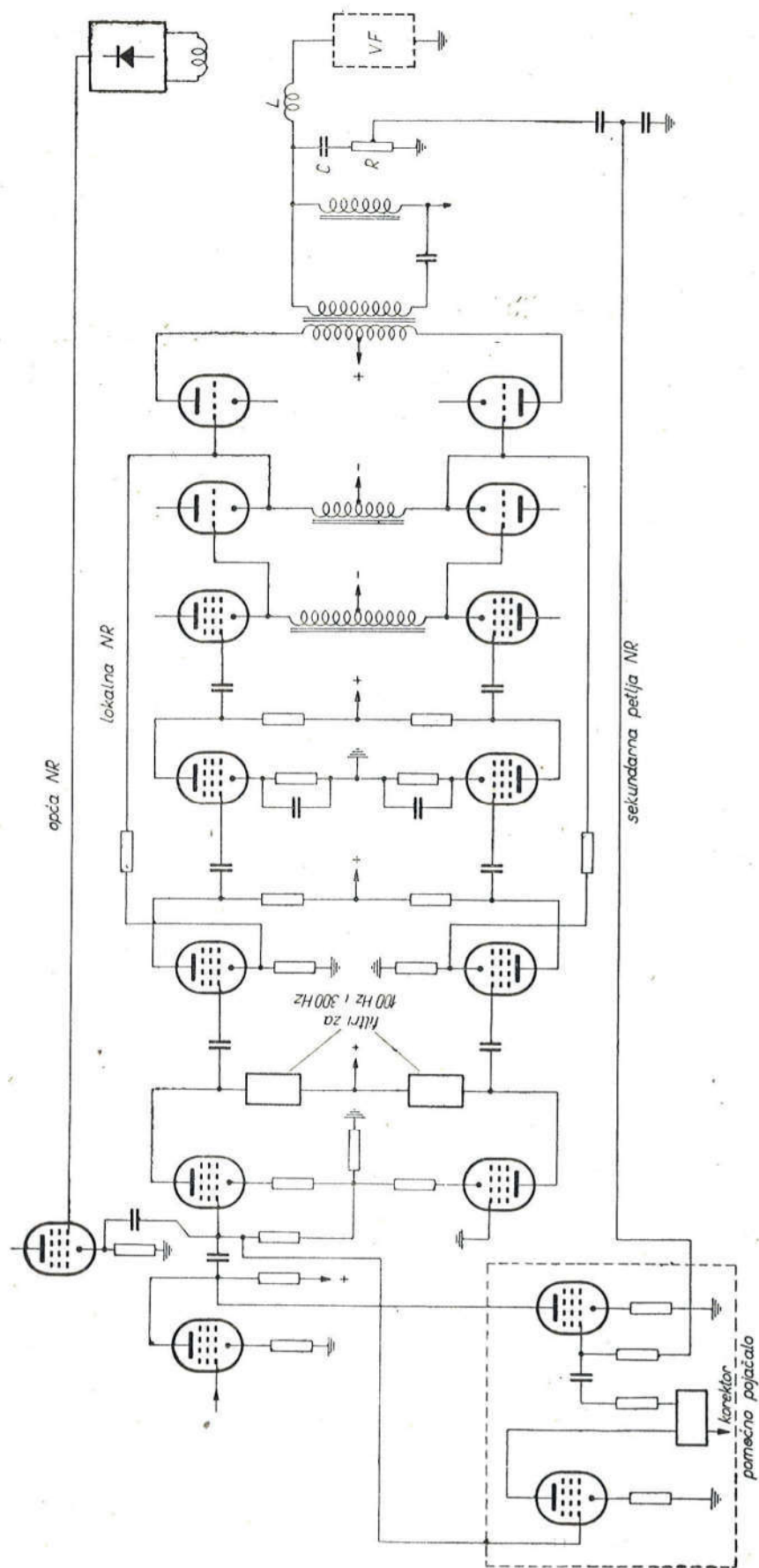
Sl. 183. Filtri u anodnom krugu nekog stupnja modulacionog pojačala povećavaju pojačanje na dotičnim frekvencijama (na frekvencijama brujanja), čime se povećava i stupanj NR za te frekvencije, odnosno u povećanoj mjeri smanjuju paraziti naponi tih frekvencija.

U glavno pojačalo se, kao što je pokazano na sl. 183. uvrste titrajni krugovi ugođeni na frekvencije brujanja 100 i 300 Hz. Time se pojačanje za napone ovih frekvencija poveća. Budući da smanjenje napona smetnji ovisi o pojačanju, to će sada zbog povećanog pojačanja brujanje pasti u većoj mjeri (u formuli (24) nazivnik je za frekvencije brujanja veći). Razumljivo, da ovakvi titrajni krugovi uzrokuju izobličenje naponske karakteristike pojačala. No djelovanjem NR ovo izobličenje se toliko smanji, da nema praktičnog značenja. Isto tako umetanje ovih filtara praktički ne pogoršava prilike s obzirom na samooscilacije.

5. Višestruka negativna reakcija kod velikog odašiljača. — Na sl. 184. prikazana je shema modulacionog pojačala jednog velikog odašiljača. Ovdje je NR provedena na pet različitih načina:

1. *Strujna NR* primijenjena je kod pojedinih elektronki, a svrha joj je, da pojačanje elektronke učini neovisnim o njezinom starenju.
2. *Lokalna NR* proteže se preko četiri stupnja. Ova je NR neovisna o frekvenciji, a izvedena je tako, da su preko djelatelja napona spojene katode dotičnih elektronki. Ovoj NR je zadatak, da poboljša svojstva pojačala s obzirom na opću NR.
3. Kod *opće NR*, reakcioni napon se dobiva demodulacijom visokofrekventnog signala. Također ova NR praktički je neovisna o frekvenciji.
4. *NR sa sekundarnom petljom* ima zadatak, kao što je već prije rečeno, da poboljša djelovanje NR kod visokih akustičkih frekvencija. Napon za ovu NR uzet je sa sekundarara modulacionog transformatora pomoću djelatelja napona sastavljenog od otpornika i kondenzatora. Kako bi ovaj napon bio u ispravnom faznom odnosu, doveden je na drugi stupanj pomoćnog pojačala.
5. *NR s pomoćnim pojačalom* izvedena je tako, da pomoćno pojačalo ima ulaz i izlaz na aktivnoj rešetki simetrizatora napona. Ovo pojačalo ima takve karakteristike, da poboljšava polarni dijagram u području, u kojem glavno pojačalo prelazi u pozitivnu reakciju.

Prije je bilo izloženo, zbog čega NR ne može uspješno potisnuti harmonike viših tonских frekvencija. Da bi se to kod ovog pojačala postiglo, umetnuta



Sl. 184. Principna shema modulatora jednog velikog odašiljača. Ovdje je NR primijenjena na pet načina.

je između pojačala i visokofrekventnog izlaznog stupnja prigušnica L i kondenzator C . Kondenzatoru je u seriju dodan otpor R , s kojega se preko kapacitivnog djelitelja napona uzima napon za sekundarnu petlju NR. Prigušnici spojen u seriju leži otpor visokofrekventnog stupnja. Na taj način prigušnica L i kondenzator C čine paralelni titrajni krug, koji je prigušen umetnutim otporima. Ovi su otpori takvi, da titrajni krug ima impedanciju neovisnu o frekvenciji. Ovim se postiže dvoje: prvo, izlazni stupanj modulatora opterećen je praktički konstantnom impedancijom, i drugo, kondenzator i prigušnica djeluju kao filter za potiskivanje harmonika viših tonских frekvencija.

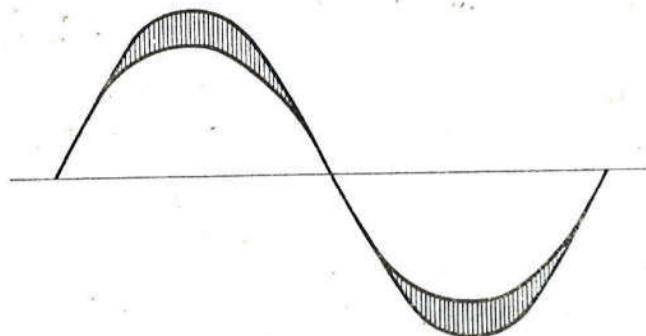
12. Ispitivanje pojačala u negativnoj reakciji na stabilnost od oscilacija

1. Jednostavan sklop i slaba negativna reakcija. — Kod pojačala u NR nije dovoljno samo ustanoviti, da uz opterećenje nominalnim radnim otporom nema oscilacija. Potrebno je praktičkim ispitivanjem utvrditi, nije li pojačalo možda upravo na granici stabilnosti, odnosno, potrebno se je osigurati, da ova granica bude dovoljno daleko. Kod jednostavnog sklopa sa NR (kad u petlju NR nije uključeno više stupnjeva pojačala, i kad se ne radi o sekundarnoj ili tercijarnoj NR), i kad je NR dovoljno slaba, često zadovoljava ispitivanje na taj način, da se uz nominalno opterećenje pojačala radnim otporom NR pojača dovoljno daleko preko one, koja se želi imati. Ako pri tome do oscilacija ne dođe, ili ako dođe, ali uz znatno povećanje NR (na primjer, tri puta ili 10 decibela, i više), onda je malena vjerojatnost, da će uz pogonske prilike nastupiti nestabilnost. Oscilacije se kod ispitivanja mogu ustanoviti oscilografom priključenim na izlaz pojačala. Oscilograf mora imati pojačalo s dovoljno širokim frekventnim pojasom (barem do nekoliko stotina kiloherca), jer se radi o oscilacijama, koje mogu biti znatno iznad čujnih frekvencija.

2. Više stupnjeva pojačala u jakoj negativnoj reakciji. — Ako se radi o jačoj NR, a naročito, ako je primijenjena sekundarna ili tercijalna NR, onda gore opisano ispitivanje nije pouzdano. Uz opterećenje radnim otporom može pojačalo biti daleko od oscilacija. No čim se optereći stanovitim kapacitetom, ono oscilira. S kapacitivnim opterećenjem pojačala treba uvijek računati. Zvučnik je s pojačalom spojen kraćim ili dužim kabelom, koji ima svoj vlastiti kapacitet. I sam zvučnik unosi u području vrlo visokih frekvencija kapacitivnu komponentu, jer se njegova električka rezonancija nalazi ispod područja, u kojem obično nastaju oscilacije. Zato se od pojačala u NR traži, da bude stabilno i uz kapacitivno opterećenje. To se odnosi i na tercijarnu NR, jer, iako sekundarni svitak nije uključen u petlju NR, ipak opteretna struja sekundara znatno utječe na amplitudu i fazu tercijarnog napona. Ako se kod nestabilnog pojačala radi o slabijoj NR, dolazi uz kapacitivno opterećenje do oscilacija u uskom području vrijednosti opteretnih kapaciteta. Naprotiv, kod jake NR je područje kapaciteta, uz koje dolazi do oscilacija, mnogo šire, a promjenom kapaciteta samo se mijenja amplituda i frekvencija oscilacija.

3. Pojačalo u AB-klasi. — Prilike su mnogo nepovoljnije, ako se radi o pojačalu klase AB. Kod ovakvog pojačala su neaktivne polovine primara

uključene tek djelomično, što može nepovoljno utjecati na naponsku i faznu karakteristiku s obzirom na stabilnost. Osim toga se može dogoditi, da se kod velikih amplituda izmjeničnog napona na rešetkama dolazi u takvo područje karakteristika elektronke, gdje je strmina znatno veća nego u radnoj točki. U ovakvom slučaju pojačalo je stabilno, dok nema signala. Ali ako se privede dovoljno velik signal, nastaju za vrijeme jednog dijela periode signala prigušene oscilacije (sl. 185.). Zato pri određivanju faktora amplitudnog osiguranja treba voditi računa o tome, koliko je strmina elektronke u području malenih prednapona veća od strmine u radnoj točki. Ako je, na primjer,



Sl. 185. Oscilogram izlaznog napona kod pojačala, koje postaje nestabilno, kad radi s velikim amplitudama.

veća dva puta, treba i faktor amplitudnog osiguranja povećati dva puta, to jest za 6 decibela. Kod mlaznih tetroda ovo povećanje treba da je barem trostruko, ili za 10 decibela. Povoljnije je, dakako, upotrebiti elektronke, koje imaju linearnije karakteristike. No lineariziranje karakteristika može se postići i pomoćnom NR, koja djeluje na vrlo širokom frekventnom pojasu, kao na primjer, kod katodnog pojačala.

4. Praktičke metode za ispitivanje stabilnosti. — Kako bi se ustanovilo, da li je pojačalo stabilno, može se preporučiti slijedeća metoda: Najprije se izlaz pojačala opterećuje čistim kapacitetima, čija se vrijednost mijenja u području između 1.000 pikofarada i 1 mikrofarada u skokovima od kojih 20%. Ovo područje kapaciteta vrijedi, prema iskustvu, za izlaze na titrajne zavojnice zvučnika. Ako se radi o višim impedancijama, treba ispitivanje vršiti s kapacitetima, koji su toliko puta manji, koliko puta je impedancija viša. Ukoliko se ovim ispitivanjem nestabilnost ne pokaže, treba ispitivanje nastaviti dovođenjem tako velikog tonfrekventnog signala na rešetke izlaznih elektronki, da dolazi do laganog splošnjavanja vrha sinusoide. Povoljno je, da frekvencija ovog signala bude najniža frekvencija, koju pojačalo treba s punom izlaznom snagom da prenese. Sekundar treba i opet opterećivati čistim kapacitetima, kao što je prije rečeno. Ako se ni sada ne pojave oscilacije (u ovom slučaju prigušene oscilacije na vrhu tonfrekventnog signala), onda pored promjenljivih kapaciteta treba sekundar opteretiti još i nominalnim otporom. Dodavanjem otpora povećava se, naime, strmina radne karakteristike, a to može da bude kritično u vezi s oscilacijama. Kod visokokvalitetnih pojačala oscilacije mogu da imaju vrlo visoku frekvenciju, radi čega treba paziti, da se pri ispitivanju upotrebi oscilograf, koji te frekvencije može prenijeti (barem do 1 megaherca).

Da bismo bili sigurni, da će pojačalo ostati stabilno i u slučaju promjene elektronke (s obzirom na njihove tolerancije), može se opisano ispitivanje vršiti uz pojačanu NR. Ako se i to učini, i pojačalo ostane stabilno, onda je vrlo vjerojatno, da je dotično pojačalo bezuvjetno stabilno, te da ne će doći do iznenađenja u pogonu.

Postoji mogućnost, da se sagradi pojačalo sa NR, koje bi bilo nestabilno s induktivnim opterećenjem. No takvi slučajevi nemaju praktičkog značenja.

Ispitivanje stabilnosti pojačala gore opisanom metodom daje mogućnost, da se otkriju kritične opteretne impedancije, koje dovode do oscilacija. Nakon ovoga mogu se uz opterećenje ovim impedancijama snimiti polarni dijagrami napona unutar petlje NR, i na temelju ocjenjivanja oblika dijagrama zaključiti, kakve korekcione sklopove treba uvrstiti, da bi se postigla stabilnost, i da bi ta stabilnost bila dovoljno velika. Da li je dodavanjem korekcionih sklopova postignut cilj, pokazat će opet ispitivanje, taj najpouzdaniji vodič konstruktora-praktičara u njegovom radu.

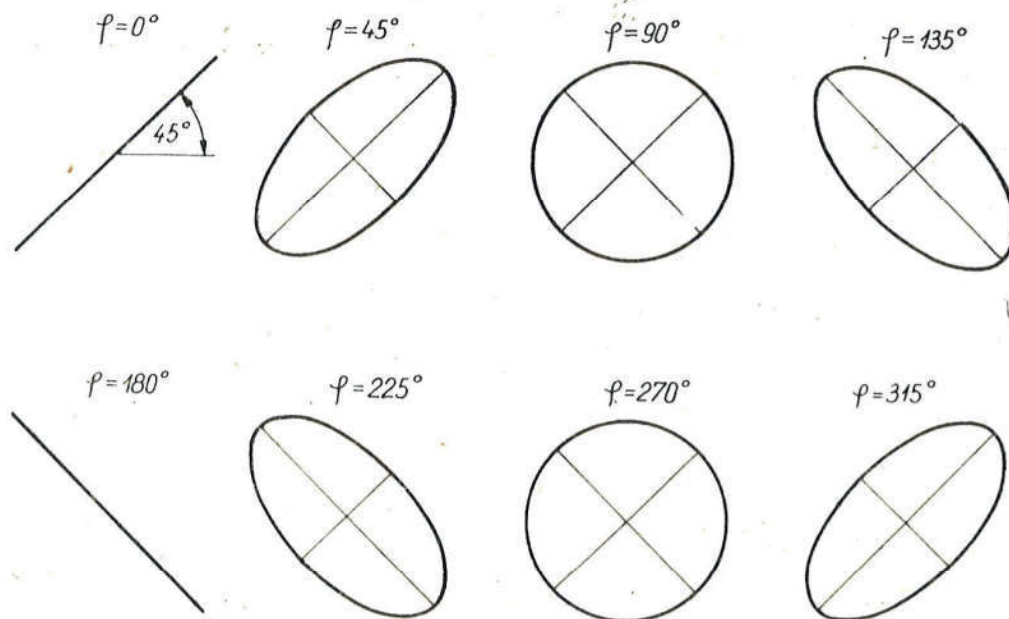
13. Mjerenje polarnog dijagrama izlaznog i reakcionog napona

U slučajevima kompliciranije NR — kad se radi o primjeni maksimalne NR, ili o višestrukoj NR, naročito u odašiljačkoj tehnici — potrebno je snimati polarne dijagrame, i prema njima odrediti mogućnosti primjene NR. Mjerenje pojačanja i faze, koje se pri tome vrši, nije jednostavno, jer to mjerenje treba provesti u vrlo širokom području frekvencija. Ovdje ćemo opisati mjernu metodu, koja nije suviše komplicirana, a daje dovoljno točne podatke za tehničku praksu.

1. Mjerenje pojačanja. — Karakteristika pojačanja se može dobiti direktnim mjerenjem izlaznog napona, ili, praktičnije, pomoću baždarenog potencijometra. Ovakav potencijometar spaja se na izlaz pojačala. Njegov otpor mora biti tako velik, da se opteretni otpor pojačala dodavanjem potencijometra praktički ne promijeni. Napon na klizaču potencijometra mjeri se elektronskim voltmetrom velike ulazne impedancije. U području najvećeg pojačanja klizač potencijometra stavi se na najniži položaj. Da bi u području manjeg pojačanja napon na voltmetru ostao isti, treba klizač pomaknuti naviše. Promjena otpora izvršena pomakom klizača mjeri se za promjenu pojačanja. Praktično je, da je potencijometar baždaren u decibelima, jer je u tom slučaju promjena položaja klizača izražena u decibelima istodobno promjena pojačanja u decibelima. Kod mjerenja polarnog dijagrama izlaznog napona može kao voltmetar poslužiti oscilograf, na kojemu treba, kao što ćemo kasnije čuti, potencijometrom ugađati nagib elipse na kut od 45° .

2. Mjerenje faze. — Mjerenje faznih odnosa, nije tako jednostavno kao mjerenje pojačanja. Istina, danas već postoje tvornički instrumenti, koji omogućuju direktno očitavanje faznog kuta. No mi ćemo ovdje opisati način, kojim se fazni odnosi mogu izmjeriti bez upotrebe posebnih instrumenata specijalno izvedenih za te svrhe. Takvo mjerenje može se izvršiti pomoću katodnog oscilografa.

Privedu li se otklonskim pločicama katodne cijevi jednaki sinusoidni naponi iste frekvencije, dobiva se na ekranu u općenitom slučaju elipsa, kojoj je velika os nagnuta prema horizontali pod kutom od 45° . Relativna dužina male osi elipse u odnosu na veliku os ovisi o faznom pomaku među naponima. Slika 186. prikazuje, kakve oblike poprima elipsa za neke specijalne fazne kutove. Kad nema faznog pomaka među naponima, mala os elipse postaje jednaka nuli, i elipsa se pretvori u pravac nagnut pod kutom od 45° prema horizontali. Uz fazni kut od 45° mala os je dva puta manja od velike osi.



Sl. 186. Ako se otklonskim pločicama katodne cijevi dovode jednaki naponi, kojima se fazni kut povećava po 45° , dobivaju se na ekranu gornje slike.

Fazna razlika od 90° daje kao sliku kružnicu. Ovo je specijalni slučaj elipse, kod koje su obje osi jednake. Uz fazni pomak od 135° elipsa opet poprima takav oblik, da joj je velika os dva puta duža od male osi, ali sada s nagibom na drugu stranu. Kad se fazni kut između napona na otklonskim pločicama poveća na 180° , dobiva se opet pravac kao i uz 0° , ali nagnut na suprotnu stranu. Daljnjim povećavanjem faznog kuta dobivaju se oblici, koje smo već upoznali, i vide se na slici.

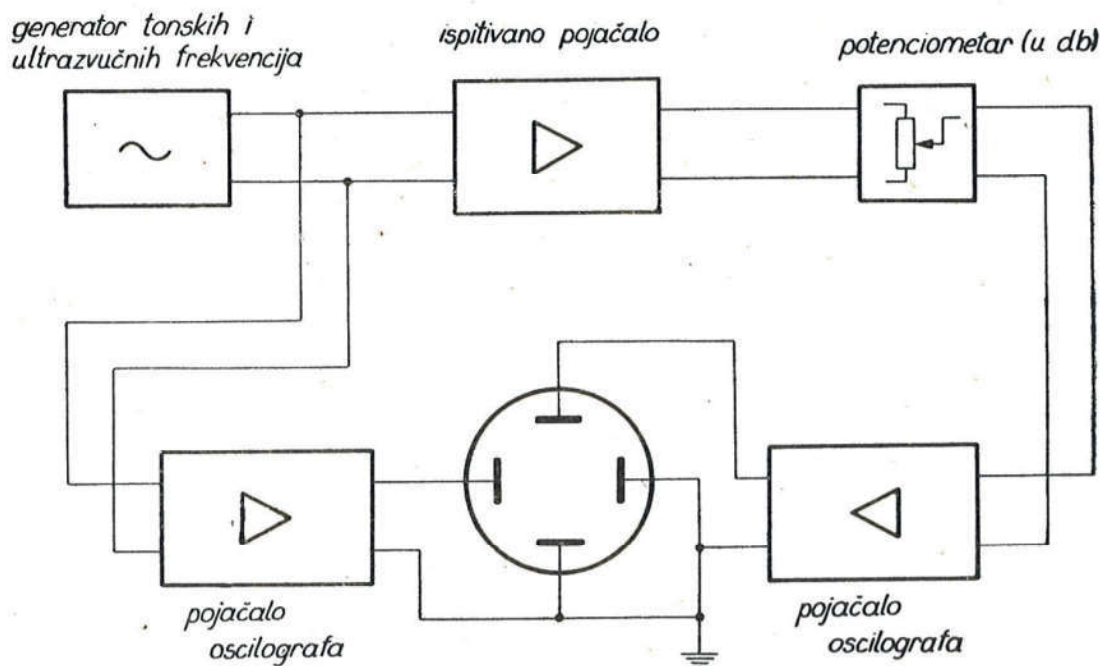
Za snimanje polarnog dijagrama ovakvi su skokovi po 45° , kako smo ih gore imali, suviše veliki. Potrebno je naći fazne kutove i za slučajeve, kad je kod elipse drugačiji odnos među osima. Slijedeća jednostavna formula daje mogućnost, da se izračuna fazni kut za bilo koji odnos među osima elipse, ako je elipsa nagnuta prema horizontali pod kutom od 45° :

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = \frac{b}{a} \quad (64)$$

Ovdje je b dužina male osi, a a dužina velike osi. Matematski izvod ove formule nalazi se na kraju knjige. Iz tablice za tangens kutova, koja je također

dodana na kraju knjige, može se naći kut, kojemu pripada dotični odnos dužine male osi prema velikoj osi. Ovaj kut treba udvostručiti, jer je kut, koji se dobiva iz tablice — kao što izlazi iz formule (64) — polovina stvarnog faznog kuta.

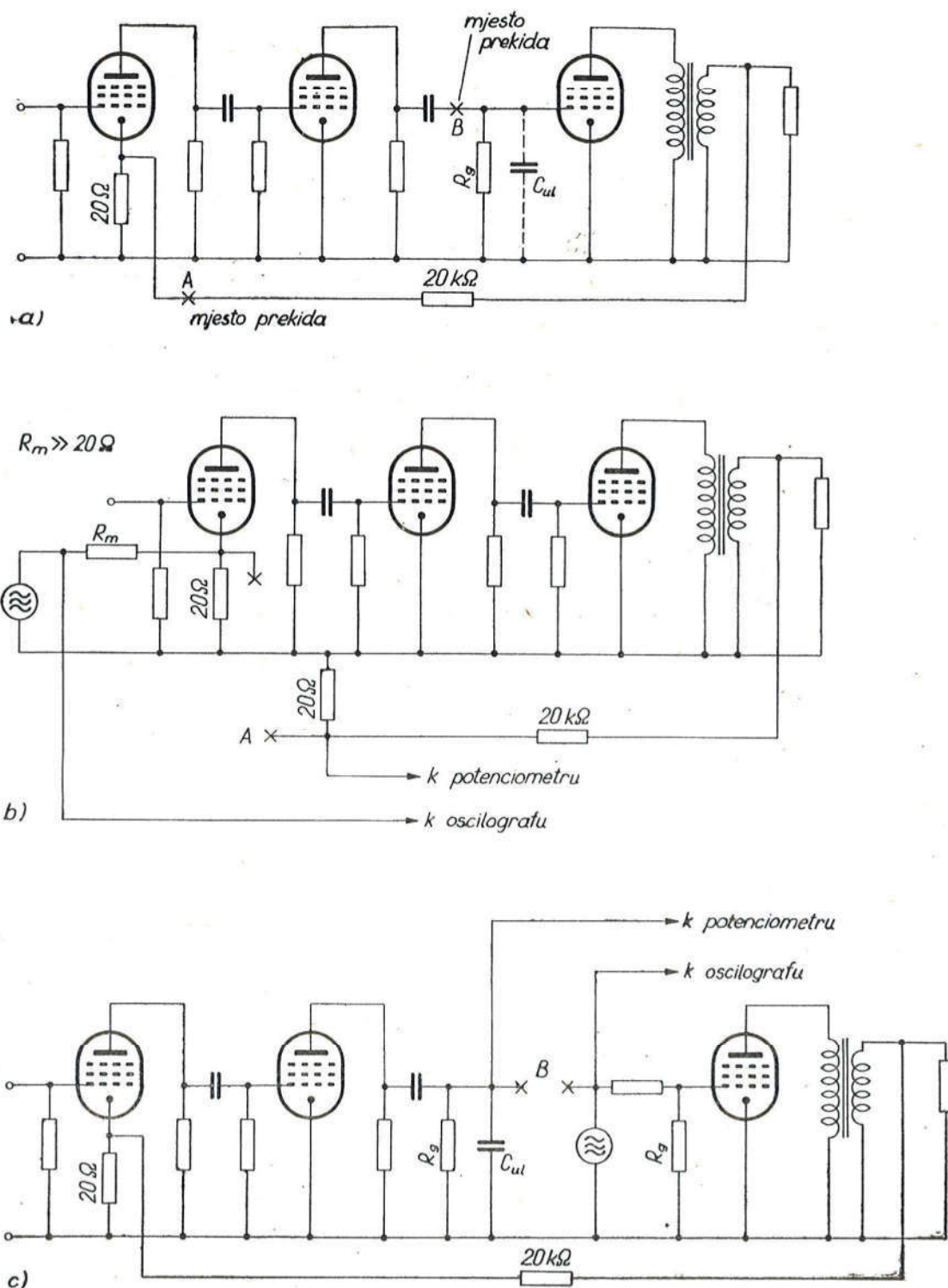
Oba para otklonskih pločica ne moraju imati jednaku naponsku osjetljivost, što je normalno slučaj. Tada nije ispravno dovoditi na pločice jednake napone, jer se zbog nejednake osjetljivosti ne dobiva nagib elipse od 45° . Pravilo je prema tome, da pločicama treba dovesti napone takve veličine, da nagib elipse bude 45° .



Sl. 187. Blok-shema, prema kojoj se može izmjeriti relativno pojačanje i fazni zakret, da se dobiju podaci za crtanje polarnog dijagrama izlaznog napona pojačala.

3. Snimanje polarnog dijagrama izlaznog napona. — Snimanje vrijednosti za polarni dijagram izlaznog napona može se izvršiti prema shemi na sl. 187. Za snimanje treba imati na raspolaganju generator, koji daje konstantan napon u području frekvencija od 1 kHz pa do 1 MHz. Budući da se radi o vrlo visokim frekvencijama, naročito pažnju treba posvetiti potenciometru. Kod potenciometra sa slabljenjem od kojih 40 do 50 decibela, kako je to potrebno za ove svrhe, teško je izbjeći utjecaj parazitnih kapaciteta. Što je otpor potenciometra viši, to su poteškoće veće. Zato se kod potenciometara građenih od običnih otpornika, kakvi se ugrađuju u pojačala i prijemnike, ne može s ukupnim otporom ići na više od nekoliko desetaka kilooma, kako bi utjecaj parazitnih kapaciteta bio u dopustivim granicama.

Na pojačalo oscilografa stavljaju se također veliki zahtjevi. Pojačala treba da prenose s konstantnim pojačanjem frekvencije do 1 MHz. Pri tome fazni zakret pojačala ne smije prijeći kojih 5° . Kako pojačala s tako širokim pojasom obično uzrokuju veći zakret, treba poznavati, odnosno izmjeriti, fazne karakteristike pojačala i uzeti ih kod mjerenja u obzir. Praktičnije je



Sl. 188. Prilikom mjerenja polarnog dijagrama reakcionog napora treba odabrati prikladno mjesto za prekid petlje NR. a) A je mjesto prekida u reakcionoj grani, B je mjesto prekida u pojačalu. b) Na mjestu prekida A treba nadoknaditi otpor od 20Ω , koji je ostao na novom ulazu. c) Na mjestu prekida B treba nadoknaditi impedancije, koje su prekidom izgubljene s jedne i druge strane prekida.

fazne zakrete kompenzirati posebnim sklopom, koji bitno ne utječe na naponsku karakteristiku.

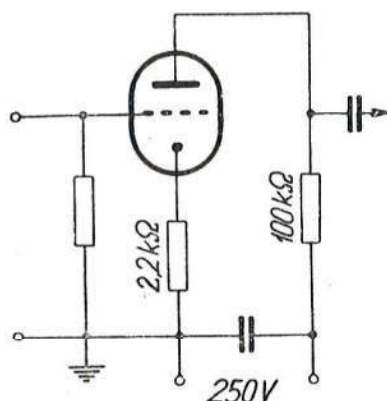
Područje ispod 1 kHz pa do nekoliko titraja na minutu također bi došlo u obzir za snimanje, ali se u području ekstremno niskih frekvencija pojavljuju velike poteškoće. To je u prvom redu problem proizvođenja sinusoidnih napona tako niskih frekvencija. Drugo, izlazni transformator i uz malene napone uzrokuje kod vrlo niskih frekvencija izobličenje, te se na zastoru umjesto elipse pojavljuje posve nepravilna krivulja, što onemogućuje mjerenje faznog kuta. I treće, pojačalo oscilografa treba ove frekvencije da prenese bez slabljenja i bez faznog zakreta, što nije nimalo lako postići. Zato se u području niskih frekvencija snimanje obično ne vrši, već se krivulja dobiva izračunavanjem. Kod niskih frekvencija ne djeluju, naime, parazitni elementi, već samo takvi, koji su pristupačni direktnom mjerenju, te je izračunavanje moguće.

4. Snimanje polarnog dijagrama reakcionog napona. — Polarni dijagram reakcionog napona mjeri se tako, da se na jednom mjestu petlja NR *prekine*, i na mjestu prekida na jednoj strani ulazi sa signalom, a na drugoj strani mjeri pojačanje i fazni kut na isti način, kao i kod snimanja polarnog dijagrama izlaznog napona. Jedino, što se ovdje pojavljuje problem izbora mjesta prekida. Posve je svejedno, da li se prekid izvrši u grani NR, ili u samom pojačalu. Na mjestu prekida treba nadoknaditi impedanciju, koja je prekidom ostala na onoj strani, koja predstavlja novi ulaz. Budući da mjerni uređaji unose svoje impedancije, povoljno je prekid izvršiti na mjestu niske impedancije, a to je obično reakciona grana. Prekid A u shemi na sl. 188a izvršen je upravo na takvom mjestu. Kako je otpor u katodi od 20 oma ostao na ulazu prekida, trebalo je isto takav otpor staviti na izlaz prekida (sl. 188b). Prekid bi se mogao izvršiti i u točki B u pojačalu. Tada bi ulaznu impedanciju na mjestu prekida, a to je paralelni sklop odvodnog otpora i ulaznog kapaciteta elektronke, trebalo nadoknaditi na izlazu prekida (sl. 188c). Kao što vidimo, ovdje bi potencijometar morao imati visoku omsku vrijednost, zbog čega je prekid u reakcionoj grani prikladniji.

GLAVA PETA

Primjena negativne reakcije u praktičkim sklopovima

U ovoj glavi opisani su sklopovi sa NR, koji se najčešće susreću u tehničkoj praksi, kao i oni, koji su posebno interesantni zbog specijalne primjene NR. Najprije su navedeni jednostavniji sklopovi, a kasnije sklopovi s više elektronki i cijela izlazna pojačala. Kod proračunavanja nije se išlo za naročitom numeričkom točnošću, i to iz jednostavnog razloga, što traženje takve točnosti u ovom slučaju nema smisla. Karakteristike, koje daju tvornice elektronki, samo su prosječne vrijednosti dobivene mjerenjem na velikom broju primjeraka, tako da u pojedinim slučajevima mogu postojati znatne razlike. Također konstante elektronki nisu konstantne vrijednosti, čak ni kod jedne te iste elektronke, već se mijenjaju s pogonskim naponima i starenjem. Sve ovo se odnosi i na ostale sastavne elemente, kao, na primjer, otpornike, čije vrijednosti mogu varirati i do $\pm 20\%$, ili elektrolitske kondenzatore, gdje su moguća još veća odstupanja od nominalnih vrijednosti. Stoga su zanemarenja, približenja i zaokruženja rezultata, koja ćemo primjenjivati u našim izlaganjima, opravdana i dopustiva. Time se dobiva na brzini izračunavanja i preglednosti, što u tehnici nema maleno značenje.



Sl. 189. Shema sklopa uz primjer 1.

Primjer 1. — U pojačalima se mnogo upotrebljava dvostruka trioda ECC 40. Izračunat ćemo, koliko se smanji pojačanje kod jedne od ovih trioda, ako se ukloni katodni kondenzator.

Uz vrijednosti elemenata, kakve su unesene u shemi na sl. 189., ova trioda prema podacima tvornice pojačava 24 puta. Uvrštavanjem u formulu (10) dobiva se pojačanje:

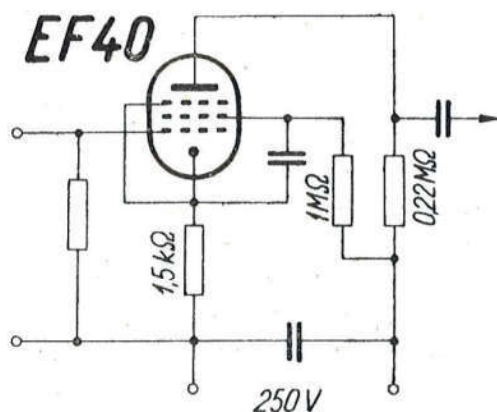
$$A' = \frac{24}{1 + \frac{2,2}{100} \cdot 24} \approx 16$$

Možemo i ovako zaključivati. Katodni otpor je $100/2,2 \approx 45$ puta manji od anodnog otpora. Prema tome na katodnom otporu djeluje napon, koji je

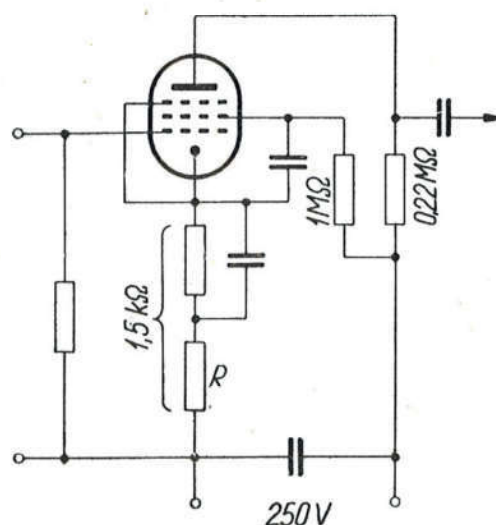
45 puta manji od anodnog. Ako uz napon od 1 volta na rešetki izlazni napon iznosi 24 volta, onda ćemo uz iste uvjete na katodnom otporu dobiti napon od $24/45 \approx 0,53$ volta. Za ovoliko je ulazni napon veći od napona na rešetki, to jest iznosi 1,53 volta. Novo pojačanje bit će, dakle, $24/1,53 \approx 16$. (U ovom izlaganju uzeli smo, da se navedeno pojačanje odnosi na napon anoda-zemlja, a ne na napon anoda-katoda, kao što bi stvarno trebalo uzeti. Iz gornjega izlazi, da je razlika između ovih napona 0,53 volta, što u odnosu na 24 volta daje razliku od nekih 2%, te se može zanemariti).

Kao što vidimo, izostavljanjem katodnog kondenzatora smanji se pojačanje ove triode na $2/3$ normalnog pojačanja, odnosno smanji se za skoro 4 decibela.

Primjer 2. — Kod pentode u normalnom sklopu nastaje uklanjanjem katodnog kondenzatora veći gubitak na pojačanju. Da vidimo, koliki je?



Sl. 190. Shema sklopa uz primjer 2.



Sl. 191. Shema sklopa uz primjer 3.

U sklopu s elementima, kao u shemi na sl. 190., pentoda EF 40, prema podacima tvornice, pojačava 190 puta. Pojačanje ove pentode u NR iznosi:

$$A' = \frac{190}{1 + \frac{1,5}{220} \cdot 190} \approx 83$$

Bez premosnog kondenzatora pojačanje iznosi samo 43% od normalnog odnosno padne za približno 7,5 decibela.

Primjer 3. — Ako je smanjenje pojačanja, koje uzrokuje nepremošteni katodni otpor, preveliko, ili ako ovolika strujna NR daje prevelik unutarnji otpor elektronke, onda se na način, koji prikazuje sl. 191., može NR smanjiti. Jedan dio katodnog otpora se premosti, a drugi dio služi kao reakcioni otpor, dok oba dijela zajedno određuju prednapon.

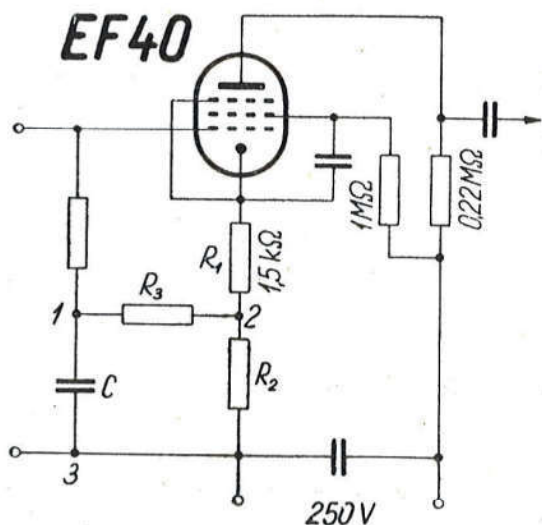
Neka u inače istom sklopu, kao u primjeru 2., pojačanje bude samo za 3 decibela manje. Koju vrijednost treba u tom slučaju da ima nepremošteni dio katodnog otpora?

Ako je puno pojačanje 190, onda je za 3 decibela manje pojačanje 133. Uvrstimo sada sve poznate vrijednosti u jednadžbu (10):

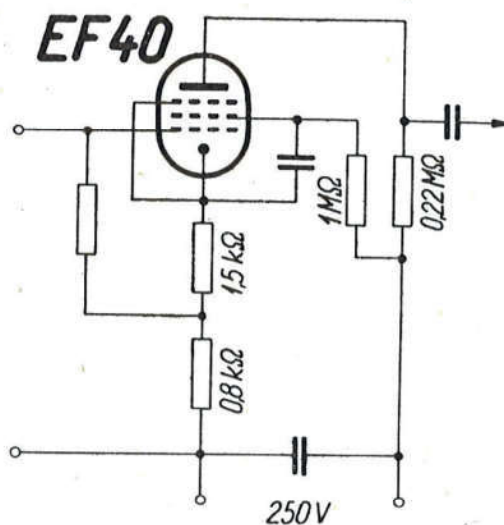
$$133 = \frac{190}{1 + \frac{R}{220} \cdot 190}$$

Odavle je $R \approx 500 \Omega$.

Primjer 4. — Katkada otpor u katodi ne daje dovoljno jaku NR. Povećavanje katodnog otpora nije dopustivo, jer bi se time promijenio normalni prednapon. U takvom slučaju može se primijeniti shema na sl. 192. Otpor R_1



Sl. 192. Shema sklopa uz primjer 4.



Sl. 193. Shema sklopa uz primjer 5.

služi za dobivanje prednapona, dok zbroj otpora ($R_1 + R_2$) određuje veličinu NR. Što se tiče istosmjernog napona, točka 1 ima isti potencijal, koji ima točka 2, a s obzirom na izmjenični napon točka 1 ima praktički isti potencijal, koji ima točka 3. Otpor R_3 je obično mnogo veći od otpora R_2 , tako da praktički ne utječe na veličinu NR. Ako je kapacitivni otpor kondenzatora C i kod najnižih prenošenih frekvencija mnogo je manji od otpora R_3 , onda je NR konstantna u cijelom prenošenom području.

Neka se opet radi o pentodi EF 40 u normalnom sklopu. Izračunajmo, koliki treba da bude otpor R_2 , ako smanjenje pojačanja uslijed NR iznosi 10 decibela?

Smanjenje pojačanja za 10 decibela predstavlja smanjenje od približno, 3 puta. Prema tome će pojačanje sa NR biti $190/3 \approx 63$. Vrijednost reakcionog otpora dobiva se iz odnosa:

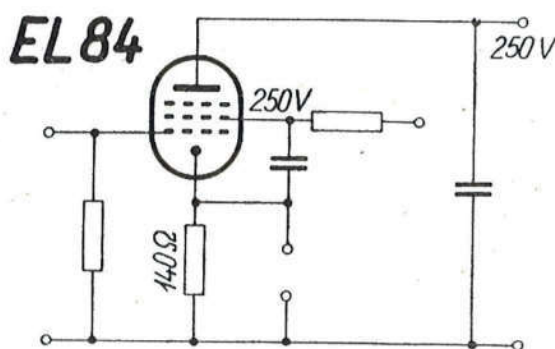
$$63 = \frac{190}{1 + \frac{R_1 + R_2}{220} \cdot 190}$$

Odavle je $(R_1 + R_2) = 2,3 \text{ k}\Omega$

Otpor R_2 iznosi: $2,3 - 1,5 = 0,8 \text{ k}\Omega$

Primjer 5. — Veći stupanj strujne NR od onoga, što se dobiva nepremoštenim katodnim otporom, može se postići također sklopom na sl. 193. Ovaj sklop se razlikuje od sklopa na sl. 192. u tome, što je ovdje ulazni otpor veći, i što je izlazni otpor ovisan o unutarnjem otporu izvora signala. Kod sklopa na sl. 193. stupanj NR je isti kao kod sklopa na sl. 192., to jest iznosi 3, te će, kao što slijedi iz formule (39), također ulazni otpor biti toliko puta veći nego bez NR.

Primjer 6. — Pentoda EL 84 upotrebljena je u katodinskom sklopu (sl. 194.). Opteretni otpor je normalan prednaponski otpor. Koliko je pojačanje i izlazni otpor?



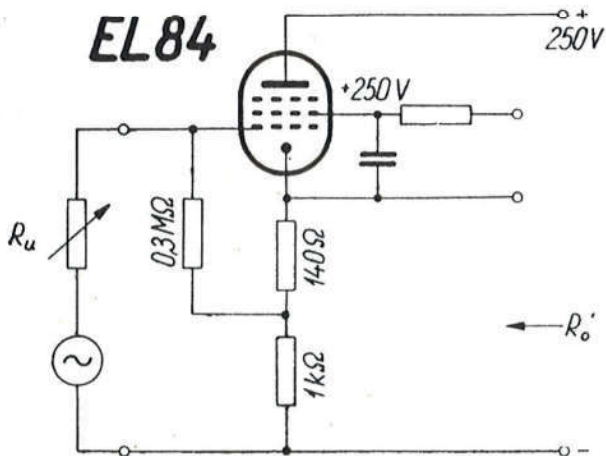
Sl. 194. Shema sklopa uz primjer 6.

Prema tvorničkim podacima strmina ove pentode je 11,3 mA/V ili 0,0113 A/V. Uz napon od 1 volta na rešetki dobiva se na otporu napon od $140 \cdot 0,0113 = 15,8$ volta. Da bi se na izlazu dobio ovaj napon, treba na ulaz dovesti napon od $15,8 + 1 = 16,8$ volta. Iz ovih podataka slijedi pojačanje:

$$A' = \frac{15,8}{16,8} \approx 0,94$$

Izlazni otpor katodina, ne uzimajući u obzir katodni otpor, ima vrijednost:

$$R_o' = \frac{1}{0,0113} \approx 90 \Omega$$



Sl. 195. Shema sklopa uz primjer 7.

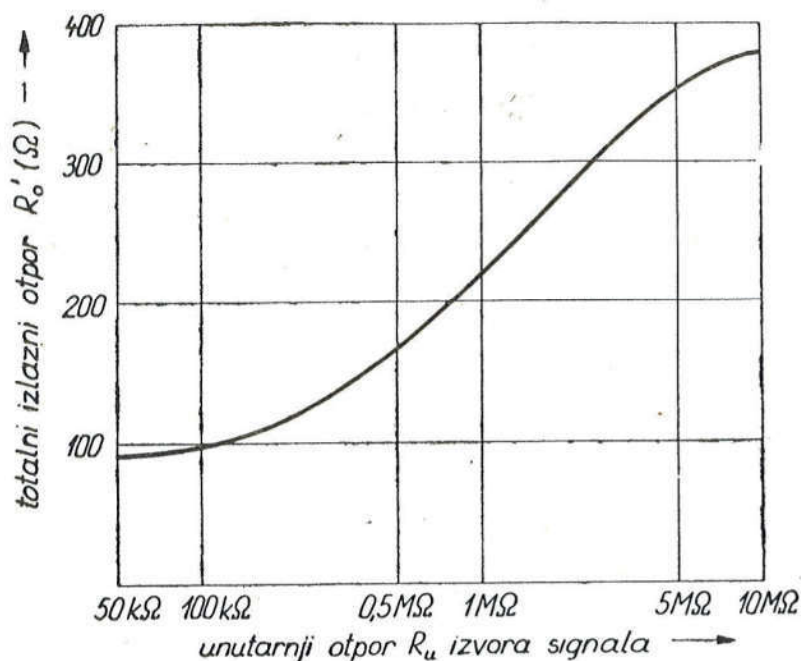
Zajedno s katodnim otporom, koji je gore izračunanom otporu spojen paralelno, dobivamo totalni izlazni otpor:

$$R_o' = \frac{90 \cdot 140}{90 + 140} \approx 55 \Omega$$

Primjer 7. — Kako se u ovisnosti o unutarnjem otporu izvora signala mijenja izlazni otpor pentode EL 84 kao katodina u sklopu prema shemi na sl. 195?

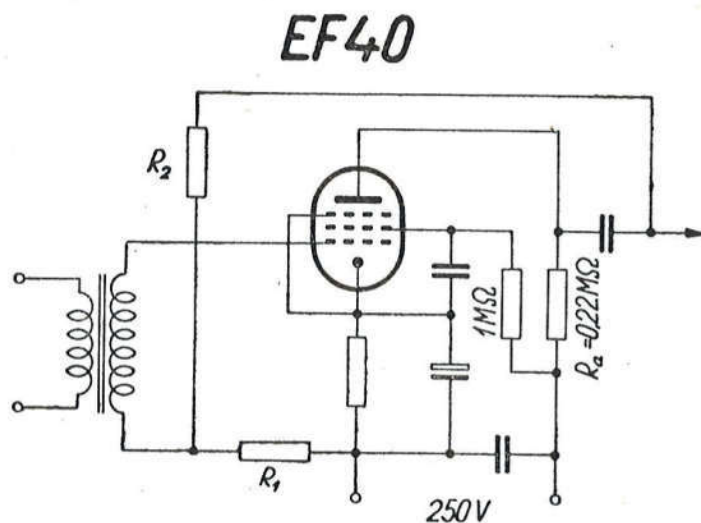
Da bismo mogli primijeniti formulu (50a), treba poznavati R_i

i μ . Prema podacima $R_i = 38 \text{ k}\Omega$, a μ se dobiva množenjem R_i sa $S : \mu = 38 \cdot 11,3 \approx 430$. Paralelno otporu izračunanom po formuli 50a) treba dodati ukupni otpor u katodi, to jest $(1000 + 140) = 1140 \Omega$. Na taj način se za vrijednosti unutarnjeg otpora izvora signala od $50 \text{ k}\Omega$ do $10 \text{ M}\Omega$ dobivaju vrijednosti totalnog izlaznog otpora, koje su nanosene u dijagramu na sl. 196.



Sl. 196. Ovisnost izlaznog otpora o unutarnjem otporu izvora signala kod sklopa na sl. 195.

Primjer 8. — Shema na sl. 197. pokazuje, kako se naponska NR može primijeniti u slučaju, kad se na ulazu nalazi transformator. Reakciona grana ($R_1 + R_2$) dodaje se paralelno anodnom otporu R_a , tako da je efektivni opte-



Sl. 197. Shema sklopa uz primjer 8.

retni otpor elektronke manji od R_a . Kako je u normalnom slučaju kod pentode otpor R_2 mnogo veći od otpora R_1 , to R_1 praktički ne će utjecati na veličinu efektnog opterećnog otpora. Da efektivni opterećni otpor ne bi dodavanjem otpora R_2 bio mnogo manji od R_a , odabrat ćemo za R_2 vrijednost, koja je skoro pet puta veća od R_a , to jest odabrat ćemo vrijednost od 1 MΩ. Neka se opet radi o pentodi EF 40 s prijašnjim podacima. Otpor od 1 MΩ paralelno sa 0,22 MΩ daje otpor od 0,18 MΩ ili 180 kΩ. U istoj mjeri, u kojoj se je smanjio opterećni otpor, smanjit će se pojačanje. Opterećni otpor je pao sa 220 kΩ na 180 kΩ, što znači, da će pojačanje umjesto 190 iznositi 155. Da vidimo, koju vrijednost mora imati otpor R_1 , ako NR treba da iznosi 12 decibela.

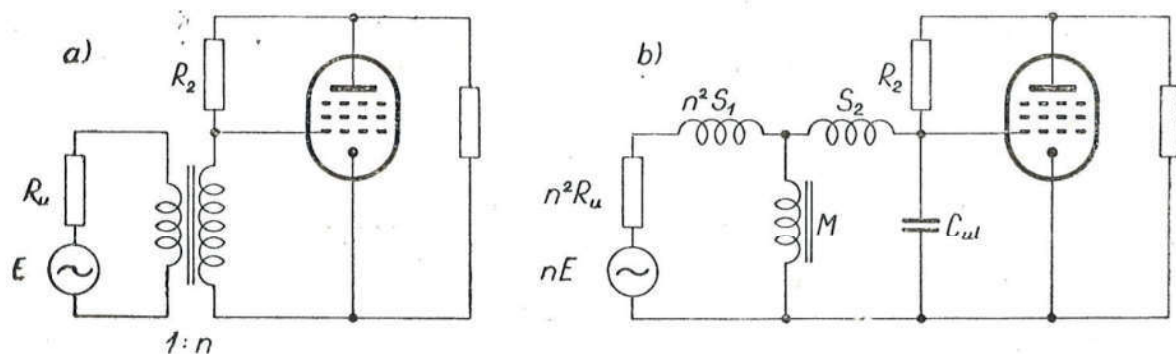
Smanjenje pojačanja za 12 decibela znači smanjenje od 4 puta. Pojačanje sa NR bit će, dakle, $155/4 \approx 39$. Uvrštavanjem u jednadžbu (34) dobivamo da je faktor β :

$$\beta = \frac{155 - 39}{155 \cdot 39} = \frac{1}{52} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \approx \frac{R_1}{R_2}$$

Za R_2 odabrali smo vrijednost od 1 MΩ, pa iz gornjega odnosa izlazi, da R_1 treba da ima vrijednost od 20 kΩ.

Kod ovog sklopa ne može se primijeniti jaka NR. Sekundar transformatora zajedno s ulaznim kapacitetom elektronke predstavlja serijski titrajni krug. Kako u titrajnom krugu nastaje kod rezonantne frekvencije fazni skok u protufazu, to uz jaču NR dolazi do oscilacija.

Primjer 9. — U reakcionu granu može se uključiti sekundar ulaznog transformatora, kao što je to učinjeno na sl. 198a. Ako se transformator prikaže nadomjesnom shemom, kao na sl. 198b, može se vidjeti, kako će stupanj



Sl. 198. a) Ulazni transformator u petlji NR.
b) Sklop kao pod a), samo umjesto transformatora njegova nadomjesna shema.

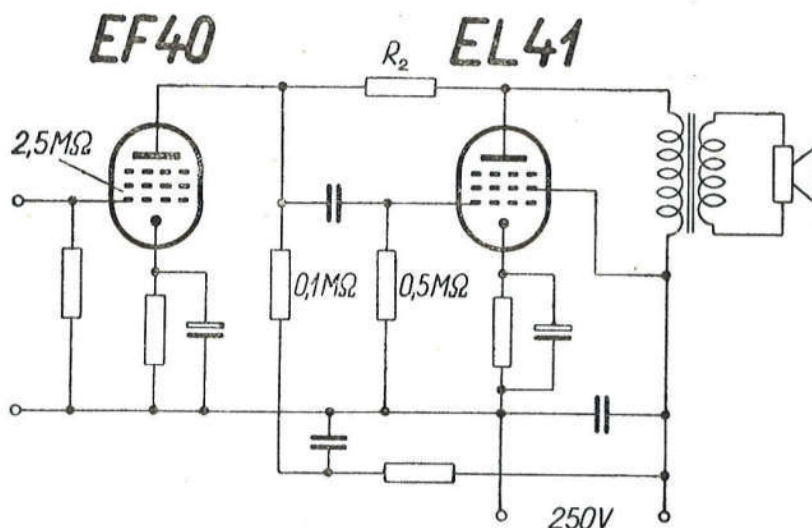
NR ovisiti o frekvenciji. U području srednjih frekvencija ne će utjecati reaktivni elementi, već će NR ovisiti o vrijednosti unutarnjeg otpora izvora signala (transformiranog na sekundarnu stranu). Kod posve niskih frekvencija NR-u određivat će pretežno međuinuktivitet M , te će NR prema nižim frekvencijama slabiti. Na isti način djelovat će na NR prema posve visokim frekven-

cijama kapacitet C_{ul} . Eventualno rasipno rezonantno izdizanje NR će prigušiti. Iz ovoga izlazi, da će NR smanjivati prigušno izobličenje uzrokovano ulaznim transformatorom.

Izračunat ćemo, koliku ćemo NR dobiti, ako se radi o istoj elektronici i istim vrijednostima elemenata, kao u primjeru 8. (osim R_1), a transformator ima prijenosni odnos 1:10, dok je unutarnji otpor izvora signala 200 Ω .

Unutarnji otpor transformiran na sekundarnu stranu ima vrijednost od $10^2 \cdot 200 = 200 = 20.000 \Omega$. Dakle, kod srednjih frekvencija stupanj NR je isti kao u prethodnom primjeru.

Primjer 10. — Spajanjem anoda susjednih elektroniki pomoću otpora dobiva se najjednostavnija naponska NR. Shema na sl. 199. prikazuje takav sklop. Da bismo harmoničko izobličenje, što ga uzrokuje izlazna elektronka,



Sl. 199. Shema sklopa za primjer 10.

smanjili tri puta, treba primijeniti NR od 10 decibela. Prema tvorničkim podacima elektronka EL 41 ima strminu od 10 mA/V i unutarnji otpor od 40 k Ω . Iz ovoga možemo izračunati faktor pojačanja: $\mu = 40 \cdot 10 = 400$. Uz opteretni otpor od 7 k Ω ova elektronka ima pojačanje:

$$A = \frac{7}{40 + 7} \cdot 400 = 60$$

Budući da se pojačanje smanjuje u istoj mjeri kao i izobličenje, to će primjenom NR pojačanje biti $60/3 = 20$. Sada imamo podatke da izračunamo faktor β (formula 34):

$$\beta = \frac{60 - 20}{60 \cdot 20} = \frac{1}{30}$$

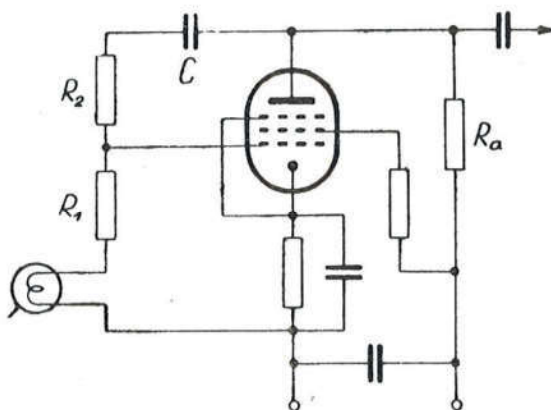
Donji otpor reakcione grane sastoji se od tri paralelno spojena otpora: unutarnjeg otpora prethodne elektronke (2,5 M Ω), njezinog anodnog otpora

(100 k Ω), te rešetkinog otpora izlazne elektronke (0,5 M Ω), što zajedno daje otpor od 80 k Ω . Iz odnosa:

$$\frac{1}{30} = \frac{80}{R_2}$$

dobivamo, da je $R_2 = 2400 \text{ k}\Omega = 2,4 \text{ M}\Omega$.

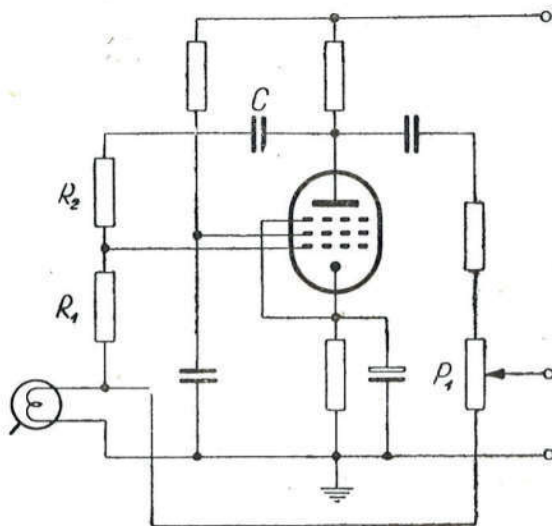
Primjer 11. — Kod reprodukcije gramofonskih ploča potrebno je izdignuti napone posve niskih frekvencija, jer su ovi naponi kod snimanja zapostavljeni. Jednostavno pretpojačalo, kojim se ovo može postići, prikazano je shemom na sl. 200. Ako se radi o pentodi, koja zbog svog velikog pojačanja omogućuje jaku NR, može se razmatranje rada ovog pojačala znatno pojednostavniti. Kod jake NR napon na otporu R_1 znatno je veći od napona rešetka-katoda, tako da možemo uzeti, da rešetka ima praktički potencijal katode. Isto tako je napon na impedanciji R_2C mnogo veći od napona rešetka-katoda, te možemo smatrati, da na impedanciji R_2C vlada izlazni napon elektronke. Uz jedinični napon na rešetki izlazni napon je jednak pojačanju elektronke. Da bi napon na rešetki bio konstantan, mora uz konstantnu elektromotornu



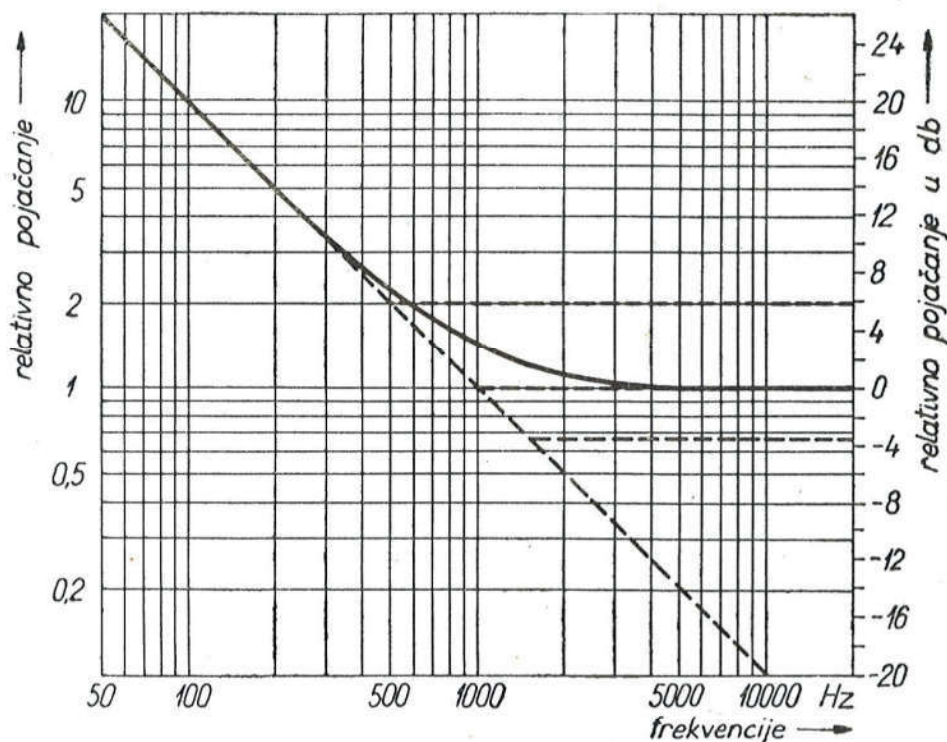
Sl. 200. Shema sklopa za primjer 11.

silu izvora signala kod svih frekvencija teći kroz otpor R_1 ista struja. Samo u tom slučaju će, naime, pad napona na otporu R_1 biti konstantan, te će konstantan biti i napon na rešetki. No ista struja, koja teče kroz otpor R_1 , teče i kroz impedanciju R_2C . Da bi ova struja bila konstantna, mora se napon na impedanciji R_2C mijenjati tako, kako se s frekvencijom mijenja sama impedancija. Izlazni napon prema tome prema nižim frekvencijama raste. Kod frekvencije, kod koje se kapacitivni otpor izjednači s otporom R_2 , izdizanje napona iznosi 3 decibela. Kod mnogo viših frekvencija kapacitivni otpor je mnogo manji od otpora R_2 , te je u tom području pojačanje konstantno, neovisno o frekvenciji. Kod frekvencije znatno niže od prelazne frekvencije (od frekvencije, kod koje izdizanje napona iznosi 3 db) prevladava kapacitivni otpor, te sa spuštanjem frekvencije izdizanje napona raste sa 6 decibela po oktavi. U blizini prelazne frekvencije dobiva se vrlo približno ovakvo izdizanje: kod frekvencije dva puta više od prelazne (za oktavu više) izdizanje iznosi 1 decibel, kod dva puta niže frekvencije 7 decibela, a kod četiri puta niže frekvencije 12 decibela.

Primjer 12. — Budući da gramofonske ploče raznih tvornica imaju različite prelazne frekvencije, postoji potreba da se prelazna frekvencija u pojačalu može mijenjati. To se u sklopu prema shemi na sl. 200. može učiniti bilo promjenljivim kapacitetom C , bilo promjenljivim otporom R_2 . No bolje je to izvršiti na način, koji prikazuje sl. 201. Ovdje se ulazni i dio izlaznog napona jedan od drugog (vektorski) odbijaju. Pomicanjem klizača na potencijometru P_1 mijenja se prelazna frekvencija. Kad bi potencijometar P_1 bio donjim svojim krajem spojen na »zemlju«, onda bi prelazna frekvencija bila određena izjednačenjem kapacitivnog otpora kapaciteta C s otporom R_2 (Na impedanciji R_2C vlada praktički puni izlazni napon; vidi primjer 11.) Dodavanjem konstantnog ulaznog napona prelazna frekvencija se mijenja, i to ovisno o odnosu napona na klizaču potencijometra prema ulaznom naponu. U području iznad prelazne frekvencije ovi naponi su protufazni, te se jednostavno odbijaju. Daleko ispod prelazne frekvencije glavni utjecaj ima kapacitet, pa se pojačanje diže onako, kako raste kapacitivni otpor, to jest diže se sa 6 decibela po oktavi. Dijagram na sl. 202. (izvučeno) prikazuje karak-



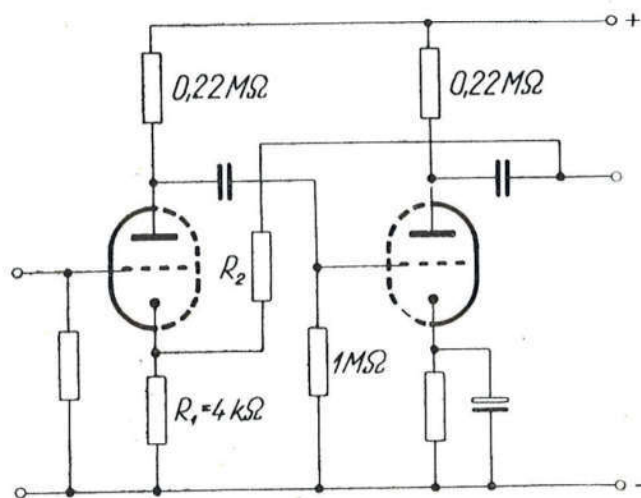
Sl. 201. Shema sklopa uz primjer 12.



Sl. 202. Prigušna karakteristika sklopa na sl. 201.

teristiku izlaznog napona, kad mu nije dodan ulazni napon. U području konstantnog pojačanja napon je jednak jedinici, a prelazna frekvencija je 1000 Hz. Neka je u području konstantnog pojačanja napon na potencijometru P_1 (između klizača i donjeg kraja potencijometra), na primjer, tri puta viši od ulaznog napona. To znači da uz jedinični napon na potencijometru ulazni napon iznosi 0,33 jedinice. Njihova razlika je 0,67 jedinica, što daje prelaznu frekvenciju od 1500 Hz. Ako je naprotiv napon na potencijometru tri puta niži od ulaznog, onda uz jedinični napon na potencijometru ulazni napon iznosi 3 jedinice, razlika je 2 jedinice, što daje prelaznu frekvenciju od 500 Hz.

Primjer 13. — Dvostruka trioda ECC 83 spojena je u sklopu prikazanom u shemi na sl. 203. NR je izvedena spojem anode drugog stupnja s katodom prvog stupnja. Izračunat ćemo gornji otpor reakcione grane R_2 , ako NR treba da iznosi 20 decibela.



Sl. 203. Shema sklopa uz primjer 13.

Prema tvorničkim podacima ova elektronka ima unutarnji otpor od 62,5 kΩ i faktor pojačanja 100. Efektivni anodni otpor sastoji se od anodnog otpora od 0,22 MΩ i paralelno dodanog rešetkinog otpora od 1 MΩ, što zajedno daje otpor od 0,18 MΩ ili 180 kΩ. Uz ovoliki opteretni otpor cijev ima pojačanje:

$$A_1 = \frac{100 \cdot 180}{62,5 + 180} \approx 74$$

Kako katodni otpor prve elektronke nije premošten kondenzatorom, dolazi do strujne NR, zbog čega pojačanje padne na:

$$A_1' = \frac{74}{1 + \frac{4}{180} \cdot 74} \approx 28$$

Druga elektronka ima anodni otpor također od 0,22 MΩ. Uz pretpostavku, da izlaz nije opterećen, i da će reakciona grana imati otpor približno od

1 M Ω , bit će i ovdje efektivni anodni otpor oko 180 k Ω , te će pojačanje biti 74. Ukupno pojačanje pojačala jednako je produktu pojedinačnih pojačanja:

$$A = 28 \cdot 74 \approx 2070$$

Za 20 decibela ili 10 puta niže pojačanje je 207. Prema formuli (34) izlazi da je faktor β :

$$\beta = \frac{2070 - 207}{2070 \cdot 207} = 0,0043$$

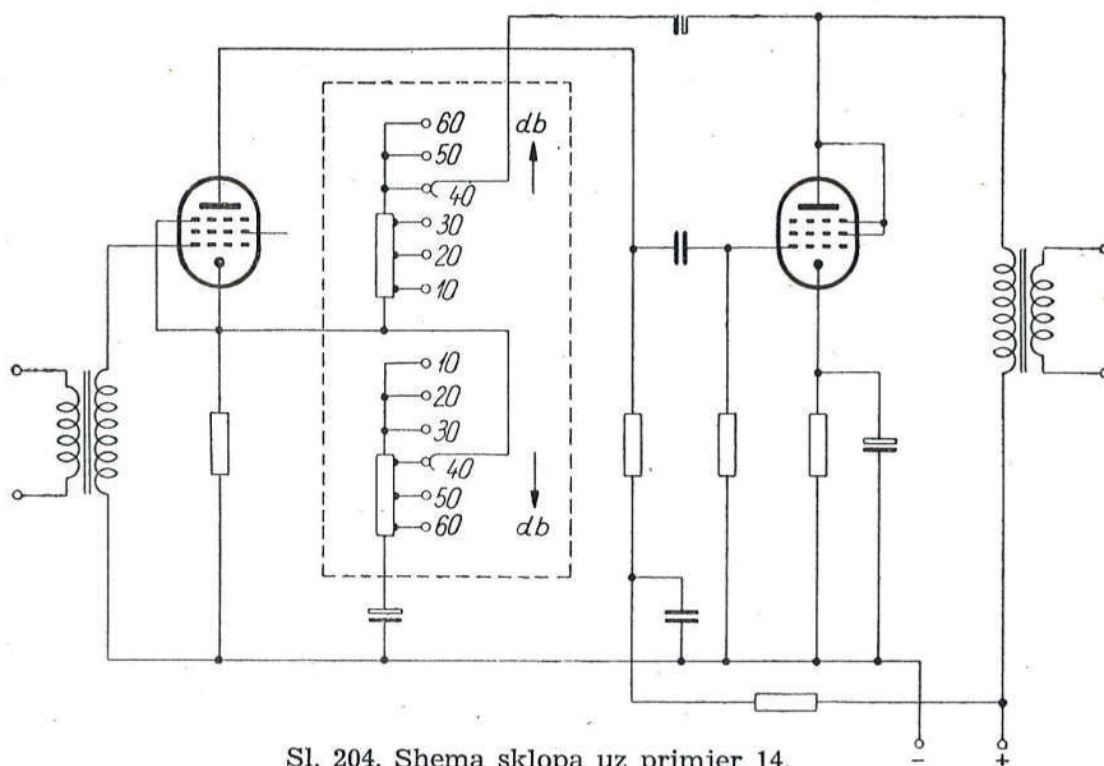
Vidimo da je β vrlo maleno, što znači, da je otpor R_2 mnogo veći od R_1 , te možemo pisati:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \approx \frac{R_1}{R_2} = \frac{4}{R_2} = 0,0043$$

Odavle je: $R_2 = 930 \text{ k}\Omega$.

Gornja pretpostavka o vrijednosti otpora reakcione grane bila je dakle točna, te nije potrebno vršiti ponovno računanje.

Primjer 14. — Već prije smo napomenuli, da se potencijometar za reguliranje glasnoće ne smije stavljati u pojačalo unutar petlje NR. Ako bi se stavio, ne bi, naime, kao što je na dotičnom mjestu izloženo (vidi: glava druga, poglavlje 7, odsjek 4), reguliranje običnim logaritamskim potencijometrom davalo promjenu napona po logaritamskoj krivulji, te regulacija ne bi



Sl. 204. Shema sklopa uz primjer 14.

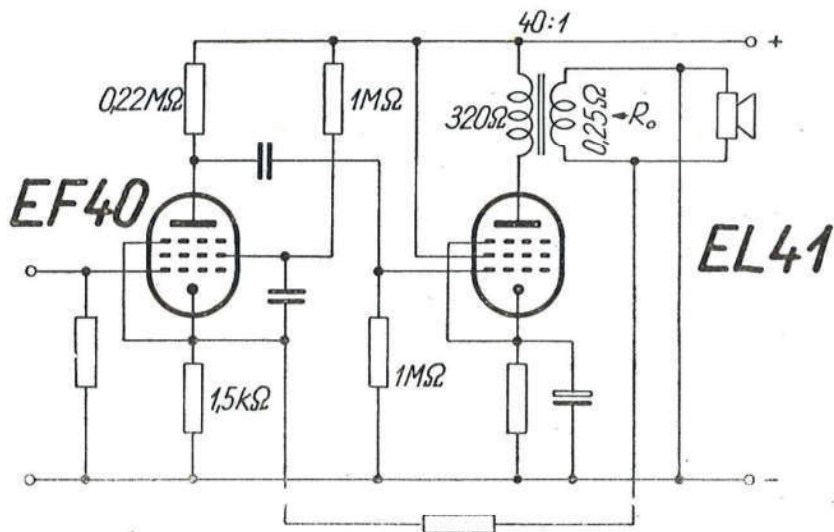
bila prilagođena čovječjem uhu. Ukoliko je ipak potrebno, da se reguliranje glasnoće provede unutar petlje NR, onda se to može učiniti reguliranjem stupnja NR pomoću reakcione grane. Za ove svrhe ne može se upotrebiti obični potencijometar, jer ne bi davao logaritamsku promjenu napona. U shemi na sl. 204. vidi se, kako je ovaj problem riješen kod jednog dvostepenog

pojačala. Reguliranje se ovdje izvodi u jednakim skokovima po 10 decibela, iz čega slijedi, da će se i glasnoća mijenjati u jednakim skokovima. Dok je pojačanje pojačala maleno, dakle NR jaka, reguliranje se vrši mijenjanjem gornjeg otpora reakcione grane. Kad se prijeđe ukupno pojačanje od 30 decibela, reguliranje se nastavlja smanjivanjem NR pomoću donjeg otpora u reakcionoj grani. Regulator pojačanja treba da ima, kao što se vidi iz sheme, dva klizača, i još k tome otpore prilagođene upravo dotičnom pojačalu. Ovakav regulator je skup, i dolazi u obzir da se primijeni samo u pojačalima za specijalne svrhe, kao što su, na primjer, pojačala u radio-studijima.

Primjer 15. — Da bi se u što većoj mjeri prigušilo istitravanje membrane zvučnika, treba da je izlazni otpor pojačala što manji. Bez NR izlazni otpor je određen unutarnjem otporom izlazne elektronke, te otporima primara i sekundara transformatora. Kod cijevi EL 41 unutarnji otpor R_i iznosi 40 kΩ. Neka primar ima otpor od 320 Ω, a sekundar 0,25 Ω. Uz odnos zavoja od 40 : 1 izlazni otpor ima vrijednost:

$$R_o = \frac{40\,000 + 320}{40^2} + 0,25 = 25,45 \, \Omega$$

Izračunat ćemo, koliki je izlazni otpor uz sekundarnu naponsku NR od 16 decibela (sl. 205.).



Sl. 205. Shema sklopa uz primjer 15.

Kako efektivni anodni otpor prve elektronke iznosi 180 kΩ (0,22 MΩ paralelno sa 1 MΩ), to će pojačanje umjesto 190 biti $(\frac{180}{220}) \cdot 190 \approx 155$, odnosno uz NR zbog nepremoštenog katodnog otpora:

$$A_1' = \frac{155}{1 + \frac{1,5}{180} \cdot 155} \approx 68$$

U primjeru 10. izračunali smo, da elektronka EL 41 pojačava 60 puta. Prema tome je pojačanje pojačala bez sekundarne NR $68 \times 60 = 4080$. Trans-

formator snizuje napon 40 puta, tako da pojačalo od ulaza do izlaza pojačava $4080/80 = 102$ puta. NR treba da smanji pojačanje za 16 decibela ili 6 puta, te će ono biti $102/6 = 17$. Sada možemo izračunati faktor β :

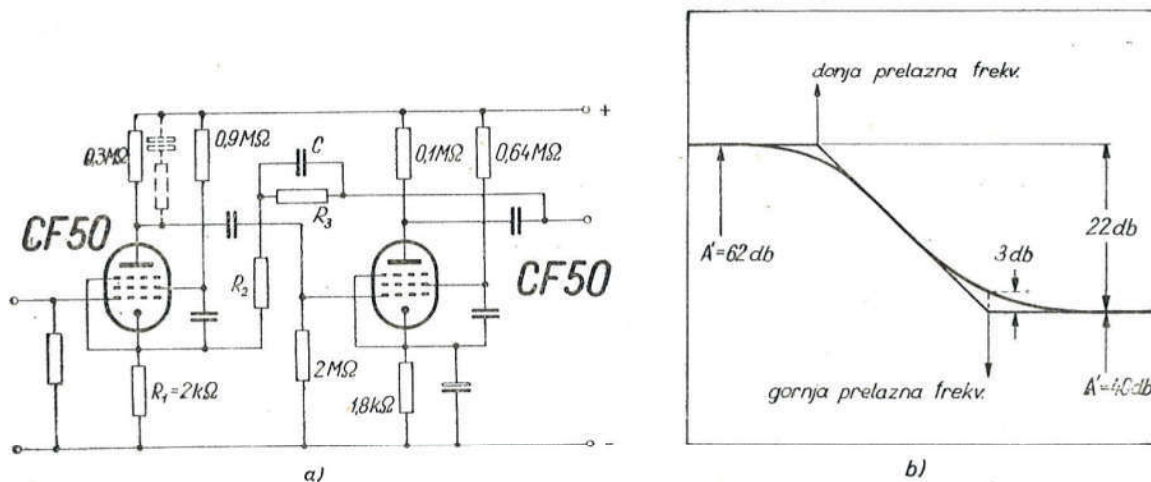
$$\beta = \frac{102 - 17}{102 \cdot 17} = 0,049$$

Faktor pojačanja izlazne elektronke je 400. Reduciran na sekundarnu stranu iznosi $400/40 = 10$. Uz NR izlazni otpor će iznositi:

$$R_o' = \frac{25,45}{1 + 0,049 \cdot 68 \cdot 10} \approx 0,74 \Omega$$

Primjenom NR od 16 db izlazni otpor se smanjio gotovo 35 puta.

Primjer 16. — Kod izdizanja napona niskih frekvencija pomoću sklopova, koje smo imali u primjerima 11. i 12., izdizanje se produžuje i u područje, koje nas ne zanima. Veliko pojačanje, do kojeg pri tome dolazi u području infrazvučnih frekvencija, može djelovati štetno, jer omogućuje, da u pojačalo prodru neželjene frekvencije (na primjer, frekvencije mehaničkog potresanja od gramofonskog motora), što može uzrokovati izobličenje u tonskom području. Premošćavanjem kondenzatora u reakcionoj grani pomoću otpora može se ova opasnost otkloniti. Ovaj način ograničavanja izdizanja primijenjen je u sklopu na sl. 206. Da bi se mogla dobiti jaka NR i u po-



Sl. 206. a) Shema sklopa uz primjer 16.

b) Prigušna karakteristika sklopa pod a).

dručju najnižih frekvencija, upotrebljena je u oba stupnja pentoda CF 50, koja ima veliko pojačanje. Uz otpor od $0,3 \text{ M}\Omega$ u anodnom krugu pojačanje ove pentode je prema podacima tvornice 315. Ovaj otpor paralelno s rešetkinim otporom drugog stupnja od $2 \text{ M}\Omega$ daje otpor od $0,26 \text{ M}\Omega$. Uz ovaj otpor pojačanje će biti toliko puta manje, koliko puta je otpor manji, to jest bit će 273. Zbog nepremoštenog katodnog otpora pojačanje će pasti na 88.

Na pojačalo ćemo staviti zahtjev, da u području visokih frekvencija pojačanje bude 40 db ($= 100$ puta), a NR da bude 42 decibela (≈ 120 puta), u području posve niskih frekvencija NR da bude 20 decibela (≈ 10 puta), gornja

prelazna frekvencija da je 800 Hz. Kod visokih frekvencija NR-u određuju otpori R_1 i R_2 , jer je kod tih frekvencija otpor kapaciteta C u odnosu na otpor $(R_1 + R_2)$ neznatan. Budući da se radi o jakoj NR, odnos otpora $(R_1 + R_2)/R_1$ daje pojačanje pojačala:

$$A' = \frac{1}{\beta} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{2 + R_2}{2} = 100$$

Odavle je $R_2 \approx 200 \text{ k}\Omega$

Otpor $(R_1 + R_2)$, ili praktički samo otpor R_2 , dodaje se paralelno anodnom otporu od $0,1 \text{ M}\Omega$, što zajedno daje efektivni anodni otpor druge elektronke od $67 \text{ k}\Omega$. Prema tvorničkim podacima elektronka CF 50 uz anodni otpor od $0,1 \text{ M}\Omega$ ima pojačanje 213, što znači, da će uz $67 \text{ k}\Omega$ imati pojačanje 143. Ukupno pojačanje pojačala bez NR bit će dakle: $88 \times 143 \approx 12.600 = 82 \text{ db}$. U području iznad gornje prelazne frekvencije pojačanje će biti $82 - 42 = 40$ decibela ili 100 puta, kao što je gore zadano. Kod posve niskih frekvencija (ispod donje prelazne frekvencije) pojačalo će uz NR od 20 decibela pojačavati $82 - 20 = 62$ decibela = 1260 puta. Sada možemo pomoću faktora β izračunati otpor R_3 :

$$\beta = \frac{12300 - 1260}{12300 \cdot 1260} = 0,00071$$

$$0,00071 = \frac{2}{2 + 200 + R_3}$$

Odavle je:

$$R_3 \approx 2600 \text{ k}\Omega = 2,6 \text{ M}\Omega$$

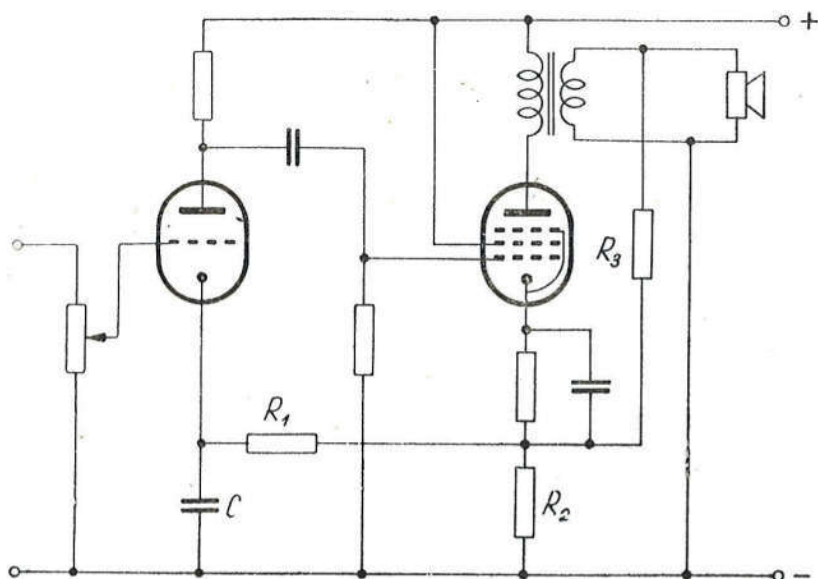
Kako je razlika između pojačanja iznad gornje prelazne frekvencije i pojačanja ispod donje prelazne frekvencije velika (22 db), to možemo računati s time, da će u sredini prelaznog područja nagib naponske karakteristike biti 6 decibela po oktavi, odnosno da će kod gornje prelazne frekvencije izdizanje napona iznositi 3 decibela. To znači, da ćemo kapacitet moći dobiti iz izjednačenja kapacitivnog otpora kondenzatora C i otpora $(R_1 + R_2)$, odnosno samo R_2 :

$$\frac{10^{12}}{2\pi \cdot 800 \cdot C \text{ (pF)}} = 200.000 \text{ }\Omega$$

Odakle je: $C \approx 1000 \text{ pF}$

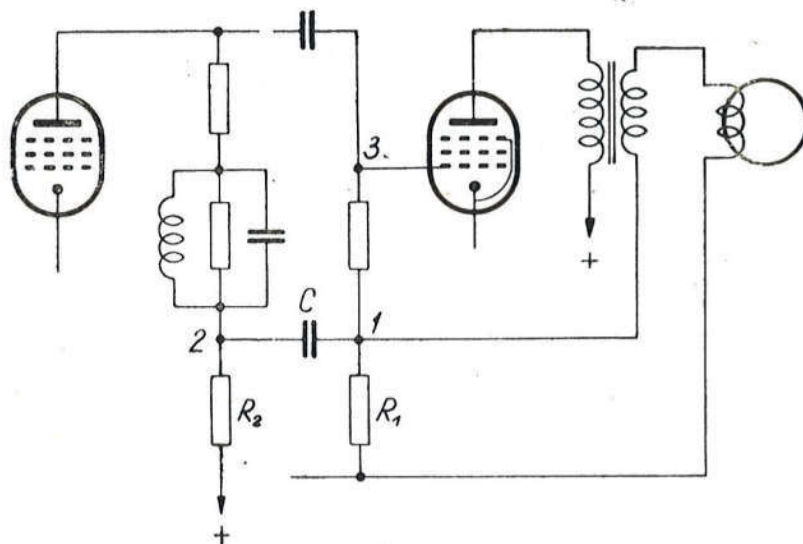
Primjer 17. — Jedna od prednosti izlazne pentode pred izlaznom triodom je u tome, što ona preko zvučnika ističe visoke tonove, koji su kod prijemnika zbog selektivnosti titrajnih krugova zapostavljeni. Pentoda se, naime, zbog svog velikog unutarnjeg otpora u odnosu na opteretni otpor ponaša kao generator konstantne izmjenične struje, te je pojačanje razmjerno opteretnoj impedanciji. Kako impedancija zvučnika prema visokim frekvencijama raste, to će i napon na zvučniku rasti. Primjenom naponske NR smanji se unutarnji otpor elektronke, te ne dolazi do isticanja visokih tonova. Na sl. 207. vidimo sklop, kojim se iskorištava prednost isticanja visokih tonova i potiskuje »bum« zvučnika, oboje bez gubitka na pojačanju. Na otporu R_2 nastaje napon, koji je proporcionalan izmjeničnoj komponenti katodne

struje. Ovaj se napon preko otpora R_1 privodi katodi prve elektronke, čime se dobiva pozitivna reakcija. Sa sekundara transformatora dovodi se na otpor R_2 , i to preko otpora R_3 , dio izlaznog napona, što preko prve elektronke daje negativnu reakciju. U normalnom slučaju oba reakciona napona su jed-



Sl. 207. Shema sklopa uz primjer 17.

naka, te se poništavaju. No kad dođe do izobličenja na zvučniku ili do »buma«, poremeti se ravnoteža reakcionih napona, te resultantni korekcionni napon dolazi na rešetku prve elektronke. Kondenzator C isključuje NR kod visokih tonova, gdje ona nije potrebna, i gdje bi spriječila isticanje toga tonskog područja.

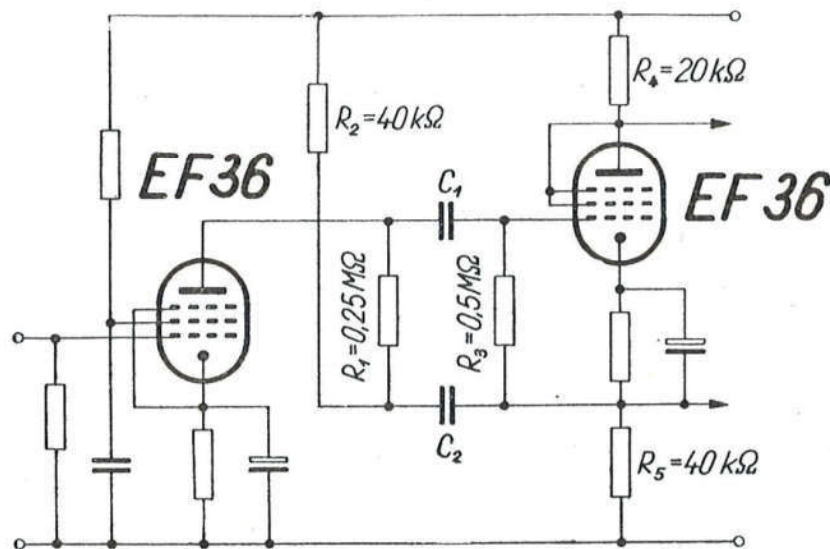


Sl. 208. Shema sklopa uz primjer 18.

Primjer 18. — Shema na sl. 208. prikazuje izlazni dio pojačala za magnetofonsko snimanje. Titrajni krug, koji se nalazi u anodnom krugu prve elektronke, ima zadatak da izdiže napone najviših tonskih frekvencija. Na izlaz

pojačala priključena je glava za snimanje. Uz jednake amplitude napona na signalnoj rešetki izlazne elektronke treba da kroz glavu za snimanje teče konstantna izmjenična struja kod svih tonskih frekvencija. Kako impedancija glave s porastom frekvencije raste, to gornji uvjet može biti ispunjen samo onda, ako izlazni stupanj ima vrlo velik unutarnji otpor, kako bi struja ovisila praktički samo o tom otporu. Zato je kod izlaznog stupnja primijenjena strujna NR. Reakcija se ne može protegnuti na koji od predstupnjeva, jer bi se poništilo djelovanje filtra. To isto bi se dogodilo i onda, kad bismo reakcionu struju doveli samo u točku 1. U tom slučaju bi se napon, koji vlada na otporu R_1 , podijelio na rešetkin otpor i titrajni krug, te bi reakcioni napon u točki 3 bio ovisan o frekvenciji. Slično bi se dogodilo i dovođenjem reakcione struje samo u točku 2 (dakako, preko kondenzatora!). Najpovoljnije je točku 1 i 2 spojiti zajedno, i na ovaj spoj dovesti reakcionu struju, kao što je to učinjeno u shemi. U ovakvom sklopu se titrajni krug nalazi spojen u seriju s vrlo velikim unutarnjim otporom elektronke, te je ovisnost reakcionog napona u točki 3 o frekvenciji vrlo malena.

Primjer 19. — Veliki nedostatak katodinskog obrtača faze je njegovo maleno pojačanje. Na sl. 209. vidimo ovaj obrtač faze u sklopu, kojim se dvije normalne elektronke postiže vrlo veliko pojačanje. Prva elektronka do-



Sl. 209. Shema sklopa uz primjer 19.

biva istosmjerni napon preko otpora R_1 i R_2 . No ovi otpori ne predstavljaju opterećni otpor elektronke. Otpor R_2 je stvarno preko izvora istosmjernog napona (preko njegovog kapaciteta) spojen paralelno otporu R_5 (otpor kapaciteta C_2 je zanemarivo malen). Kako oba ova otpora imaju po $40 \text{ k}\Omega$, to zajedno daju $20 \text{ k}\Omega$, to jest upravo onoliko, koliko iznosi vrijednost anodnog otpora R_4 druge elektronke. Time je osigurana jednakost protufaznog napona. Otpori R_1 i R_3 spojeni su (preko kapaciteta C_1 i C_2) paralelno, čime se dobiva otpor od $0.166 \text{ M}\Omega$. Kao što znamo iz razlaganja o katodinskom obrtaču faze, njegov ulazni otpor je deset puta veći od otpora rešetka-katoda, što u ovom slučaju

daje vrijednost od 1,66 MΩ. Kako je kod elektronke EF 36 faktor pojačanja 4500, a unutarnji otpor 2,5 MΩ, to kao pojačanje prve elektronke dobivamo:

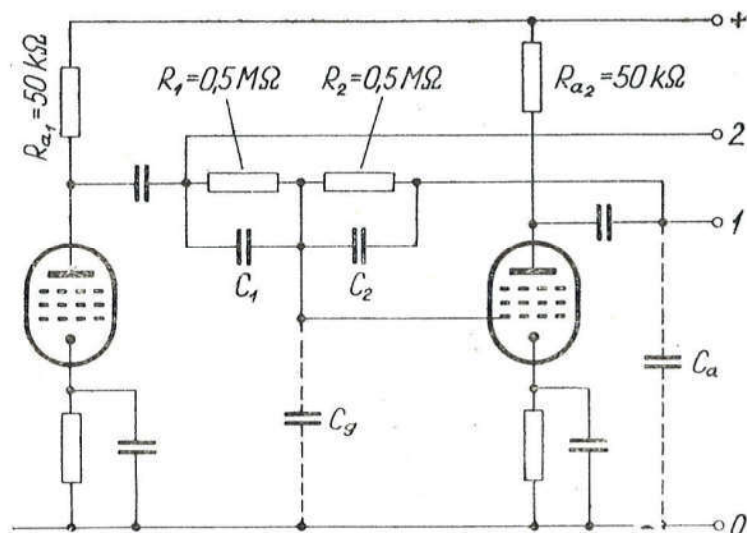
$$A_1 = \frac{4500 \cdot 1,66}{2,5 + 1,66} \approx 1800$$

Pojačanje obiju elektronki (od ulaza pojačala do pojedinog izlaza):

$$A = 1800 \cdot 0,9 = 1620$$

Dobiva se, dakle, pojačanje, koje je oko 10 puta (za 20 db) veće, nego što se može postići s dvije elektronke u običnom sklopu.

Primjer 20. — Kod obrtača faze na sl. 210. jedan je od protufaznih napona uzima s anode prve elektronke, a drugi s anode druge elektronke. Do jednakosti ovih napona dolazi iz dva razloga: prvo, što napon s anode prve elektronke dolazi na rešetku druge elektronke preko djelitelja napona. Otpori R_1 i R_2 su mnogo veći od otpora R_{a2} , te možemo smatrati, da je anoda na potencijalu zemlje. Kako su otpori R_1 i R_2 jednaki, to napon s anode prve

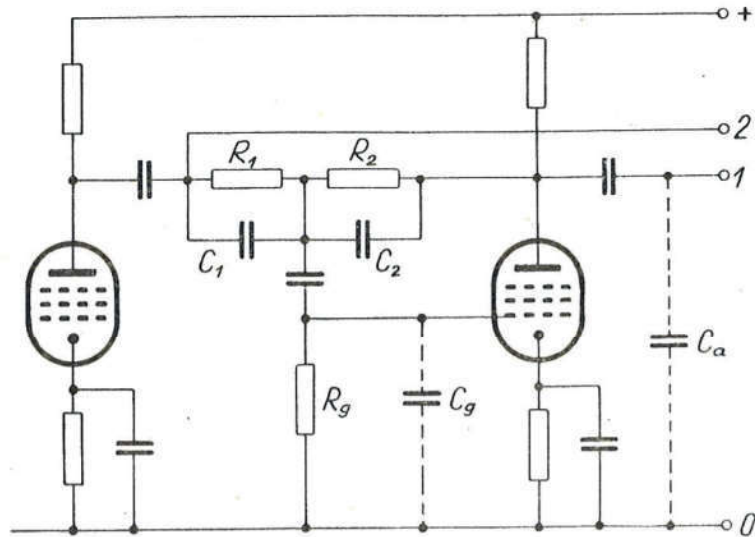


Sl. 210. Shema sklopa uz primjer 20.

elektronke dolazi na signalnu rešetku druge elektronke prepolovljen. Drugi razlog za jednakost napona leži u tome, što djelitelj napona za NR čine opet otpori R_1 i R_2 , jer je također anodni otpor prve elektronke mnogo manji od ovih otpora, pa ga nije potrebno u ovom slučaju uzimati u obzir. Faktor β , dakle, jednak je $1/2$, odnosno pojačanje druge elektronke u NR je 2. Budući da ova elektronka dobiva kao signal samo pola anodnog napona s prve elektronke, to su izlazni naponi s obiju anoda jednaki.

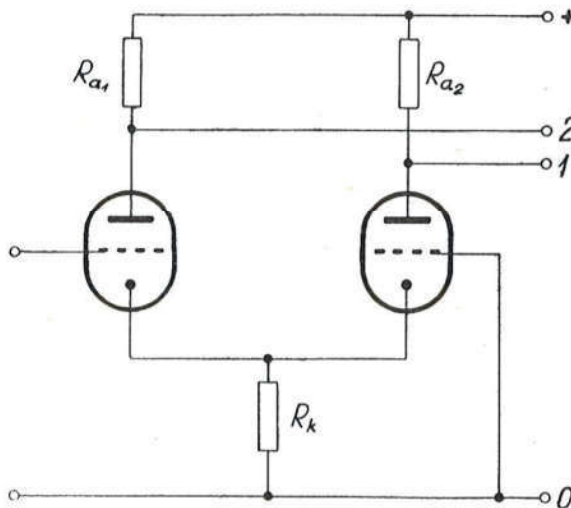
Kod visokih frekvencija dolazi do utjecaja kapacitet rešetka-katoda C_g i kapacitet anoda-katoda C_a . Djelovanje ovih kapaciteta može se u stanovitoj mjeri umanjiti dodavanjem odgovarajućih kapaciteta paralelno otporu R_1 i R_2 . Neovisnost izlaznog napona o frekvenciji ne može se postići, jer kao što se može vidjeti iz sheme, otpori R_{a1} , R_1 , R_2 i R_{a2} čine π -spoj, dok kapaciteti C_g , C_1 , C_2 i C_a čine opterećeni T-spoj.

Povoljnija naponsko-frekventna karakteristika dobiva se sklopom prikazanim na sl. 211. Ako su vremenske konstante spojeva R_1C_1 , R_2C_2 i R_gC_g međusobno jednake, onda T-sklop postaje neovisan o frekvenciji sve dotle, dok značajniju ulogu ne preuzme kapacitet C_a .



Sl. 211. Shema sklopke uz primjer 20.

Ako su otpori R_1 , R_2 i R_g jednaki, napon na signalnoj rešetki druge elektronke iznosi jednu trećinu napona, koji vlada na anodi prve elektronke (otpori R_2 i R_g su praktički spojeni paralelno!). Iz istog razloga faktor β je jednak $1/3$, te je pojačanje drugog stupnja 3. Izlazni naponi imaju i ovdje, kao što vidimo, iste vrijednosti.

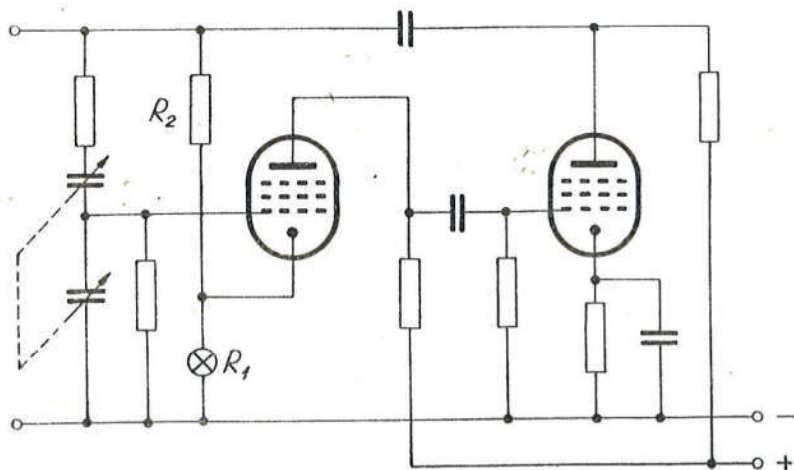


Sl. 212. Shema sklopa uz primjer 21.

Drugim riječima: Ulazni napon je približno dvostruko veći od napona rešetka-katoda, odnosno pojačanje je upola manje nego bez katodne veze.

Primjer 21. — Katodno vezani obrtač faze vidimo u principnoj shemi na sl. 212. Signal za drugu elektronku dobiva se kao pad napona na otporu R_k , kroz koji teče razlika izmjeničnih struja pojedinih elektronki. Da bi razlika u strujama postojala, struje ne smiju biti jednake. Iz toga slijedi, da otpori R_{a1} i R_{a2} također ne smiju biti jednaki, jer bi uz jednake otpore izlazni naponi bili nejednaki. Ako su otpori R_{a1} i R_{a2} približno jednaki, struje su također po vrijednosti blizu, te je njihova razlika malena. Iz ovog slijedi, da R_k mora biti velik. No ako su struje skoro jednake, onda su i naponi rešetka-katoda kod obje elektronke približno jednaki (uz pretpostavku, da su elektronke istoga tipa).

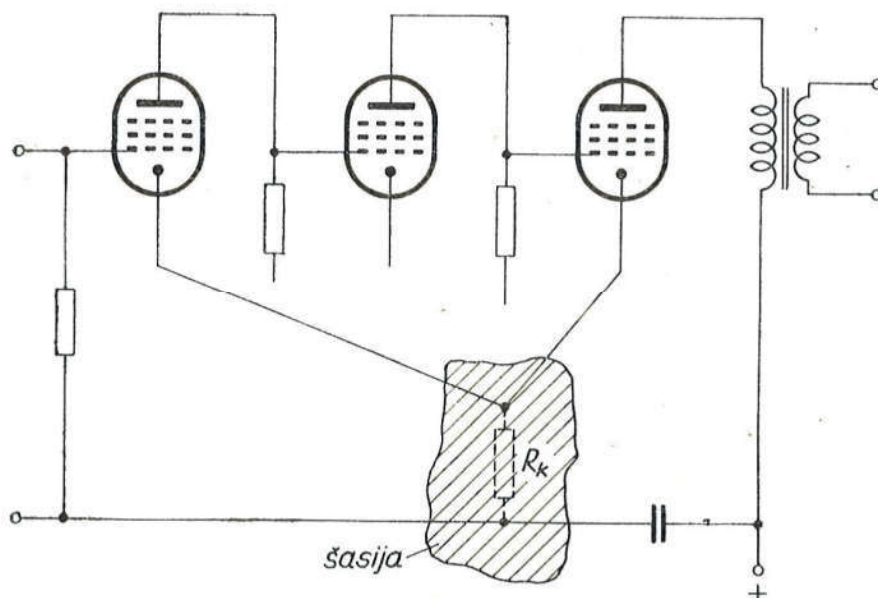
Primjer 22. — Kod RC-generatora treba izlazni napon održavati konstantnim. To se može postići na taj način, da se kao donji otpor reakcione grane upotrebi otpor, kojemu je vrijednost u velikoj mjeri ovisna o temperaturi (sl. 213.). Takav otpor predstavlja na primjer električna žarulja. Ako se struja,



Sl. 213. Shema sklopa uz primjer 22.

koja teče kroz ovaj otpor, zbog porasta izlaznog napona poveća, poraste vrijednost otpora, te se pojača NR, odnosno ublaži porast pojačanja.

Primjer 23. — Kad se strujna NR primijeni preko više stupnjeva, treba u formulu (11) kao dinamičku strminu uvrstiti strminu cijelog pojačala, odnosno dijela pojačala obuhvaćenog petljom NR. Kod trostepenog pojačala



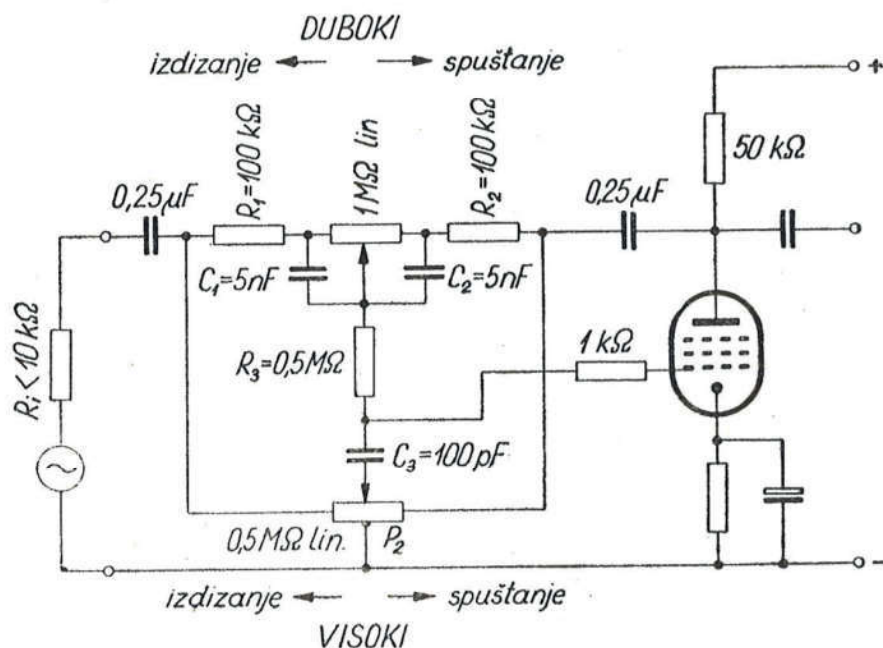
Sl. 214. Shema sklopa uz primjer 23.

u shemi na sl. 214. neka prvi i drugi stupanj pojačava svaki 100 puta, a izlazni stupanj neka ima strminu 10 miliampera po voltu. Prva dva stupnja zajedno imaju pojačanje $100 \times 100 = 10.000$, što znači, da će uz napon od 1 volta na

rešetki prve elektronke djelovati na rešetki treće elektronke napon od 10.000 volta. Dakako, da je ovo samo fiktivna računska vrijednost, jer se toliki napon niti može postići drugom elektronkom, niti smije privesti trećoj elektronki. Ako se anodna struja izlazne elektronke uz primjenu napona na rešetki od 1 volta promijeni za 10 miliampera, onda će uz 10.000 volta promjena iznositi $10000 \cdot 0,01 = 100$ ampera. Dakle: uz izmjenični napon od 1 volta na rešetki prve elektronke dobiva se izmjenična komponenta struje u izlaznoj elektronki od 100 ampera, to jest strmina pojačala je 100 ampera po voltu.

Ovakva golema strmina zahtijeva posebnu pažnju pri uzemljivanju, jer može lako doći do nehotične NR. Ako između uzemne točke katode izlazne elektronke i uzemne točke rešetkinog otpora prve elektronke postoji otpor samo od stotinke oma ($R_k = 0,01\Omega$), nastaje na ovom otporu kod napona od 1 volta na ulaznoj rešetki pad napona od $100 \cdot 0,01 = 1$ volt. Da bi se dobio isti izlazni napon, treba sada na ulaz privesti napon od 2 volta, što znači, da je zbog nehotične NR pojačanje pojačala palo na polovinu.

Primjer 24. — Sklop na sl. 215. omogućuje kontinuirano izdizanje i spuštanje niskih i visokih tonskih frekvencija. Opisan je u časopisu *Wireless World*, oktobar 1952, u članku P. J. Baxandall-a: Negative-Feedback Tone Control. Djelovanje ovog sklopa je prilično složeno, pa ćemo ga izložiti u nekoliko faza.



Sl. 215. Shema sklopa uz primjer 24.

U području niskih frekvencija kapacitet C_3 ima vrlo velik otpor, tako da potencijal, na kojem se nalazi klizač potenciometra P_1 , vlada praktički i na signalnoj rešetki elektronke. Prema tome se gornja shema može za to područje frekvencija pojednostavniti, te se dobiva shema na sl. 216. Kad je klizač potenciometra točno na sredini, onda je gornja impedancija reakcione grane jednaka donjoj impedanciji. To je slučaj posve analogan onome u pri-

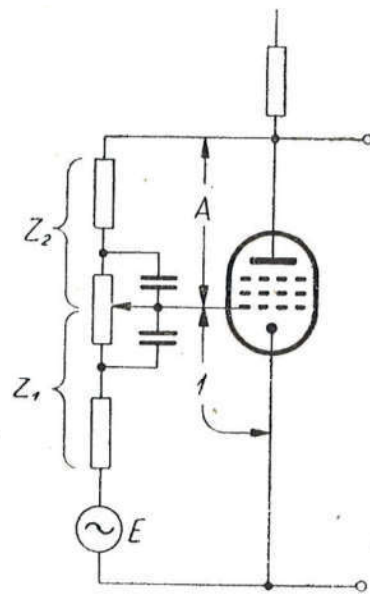
mjeru 20., gdje smo imali, da je u tom slučaju pojačanje sklopa jednako jedinici. Budući da je gornja impedancija identična donjoj, pojačanje je za sve niske frekvencije konstantno.

Do toga, koliko je pojačanje sklopa, možemo doći i drugačijim načinom od onoga, kako je učinjeno u primjeru 20. Održavajući napon na rešetki konstantnim na vrijednosti od 1 volta, dobiva se između rešetke i anode — a to znači na impedanciji Z_2 — napon od A volta (zapravo $(A + 1)$ volta, odnosno približno A volta). Napon izvora signala E vlada gotovo u cijeloj svojoj vrijednosti na impedanciji Z_1 , jer je napon rešetke prema katodi tako malen u odnosu na napon E , da se može uzeti, da je rešetka na potencijalu zemlje (rešetka je »virtuelna zemlja«). Kako je pojačanje sklopa jednako odnosu napona A/E , to iz toga slijedi, da je ovo pojačanje jednako također odnosu impedancija Z_2/Z_1 . Kroz ove impedancije teče naime ista struja, te su naponi na njima razmjerni impedancijama.

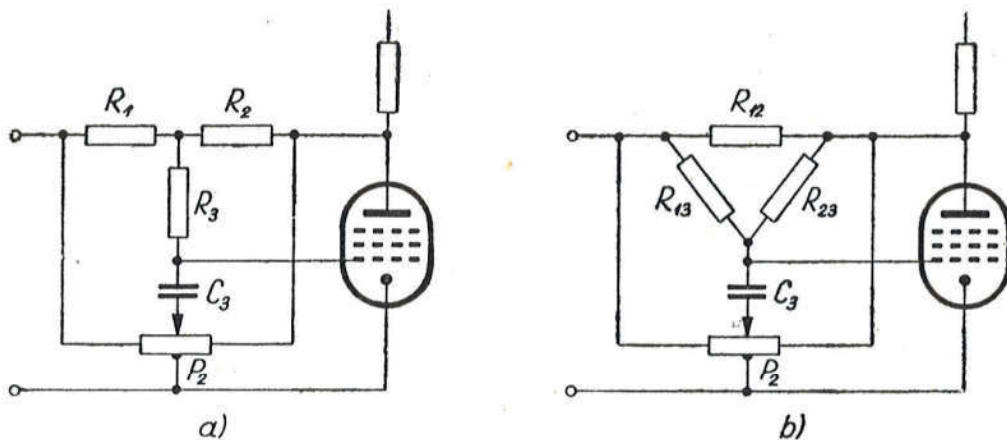
Pomicanjem klizača potencijometra P_1 prema gore smanjuje se impedancija Z_2 , a povećava impedancija Z_1 . Time odnos impedancija Z_2/Z_1 postane veći od jedinice, što znači, da se pojačanje poveća. Što je frekvencija niža, to je ovaj odnos — uz isti položaj klizača — veći. Dobiva se dakle izdizanje napona niskih frekvencija.

Obrnuto se dobiva pomakom klizača na niže. Odnos impedancija Z_2/Z_1 postane tada manji od 1, te se dobiva spužtanje napona niskih frekvencija.

Izdizanje i spužtanje napona visokih frekvencija dobiva se na nešto kompliciraniji način. U tom području frekvencija kapaciteti C_1 i C_2 šuntiraju potencijometar P_1 , tako da nijedan od ova tri elementa nema utjecaja. To pojednostavljuje shemu na oblik, koji vidimo na sl. 217a. Otpori R_1 , R_2 i R_3 čine ovdje trokraku zvijezdu. Kao što je poznato iz opće elektrotehnike, ovakva zvijezda može se pretvoriti u trokut, a da se time za vanjski krug ništa ne promijeni. Iz toga slijedi, da sklop prema



Sl. 216. Shema uz primjer 24.

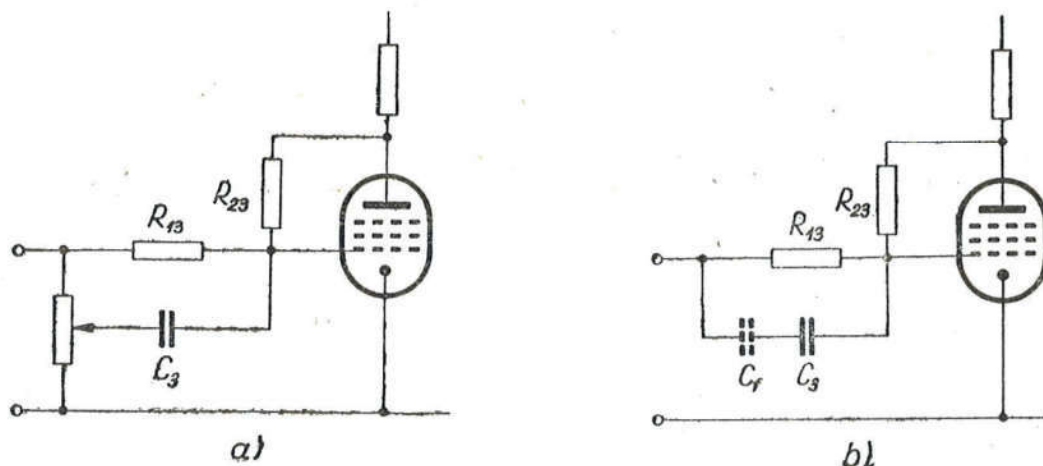


Sl. 217. Sheme uz primjer 24.

shemi na sl. 217b ima istu prigušnu karakteristiku kao i sklop prema shemi na sl. 217a. Pretvaranje zvijezde u trokut omogućit će nam, da lakše sagledamo, kako ovaj sklop djeluje.

Otpor R_{12} je s obje strane spojen preko malenog otpora na zemlju. S lijeve strane to je unutarnji otpor izvora signala, koji prema pretpostavci mora biti malen. S desne strane to je otpor elektronke u NR, u paralelnom spoju s anodnim otporom. Otpor R_{12} možemo prema tome smatrati praktički spojenim paralelno izvoru signala, odnosno paralelno elektronki. Iz toga slijedi, da ovaj otpor ne će bitno utjecati na prigušnu karakteristiku sklopa, te ga u razmatranju ne ćemo uzimati u obzir.

Najprije ćemo pogledati, kako sklop djeluje, ako se klizač potencijometra P_2 pomakne na lijevu stranu od sredine. Za takav slučaj vrijedi shema na sl. 218. Postavi li se klizač sasvim na gornji kraj potencijometra, ostaje potencijometar bez utjecaja. U tom slučaju će pojačanje ovisiti o odnosu otpora R_{23} prema impedanciji $R_{13} \parallel C_3$. Budući da impedancija prema višim frekvencijama pada, to odnos raste, pa dolazi do izdizanja napona visokih frekvencija. Kod dovoljno visokih frekvencija praktički prestaje utjecaj otpora R_{13} , i ostaje samo utjecaj kapaciteta C_3 . Kako otpor kapaciteta s povišenjem frekvencije pada za 6 decibela po oktavi, to će se odnos otpora, pa prema tome i pojačanje, dizati za 6 decibela po oktavi.



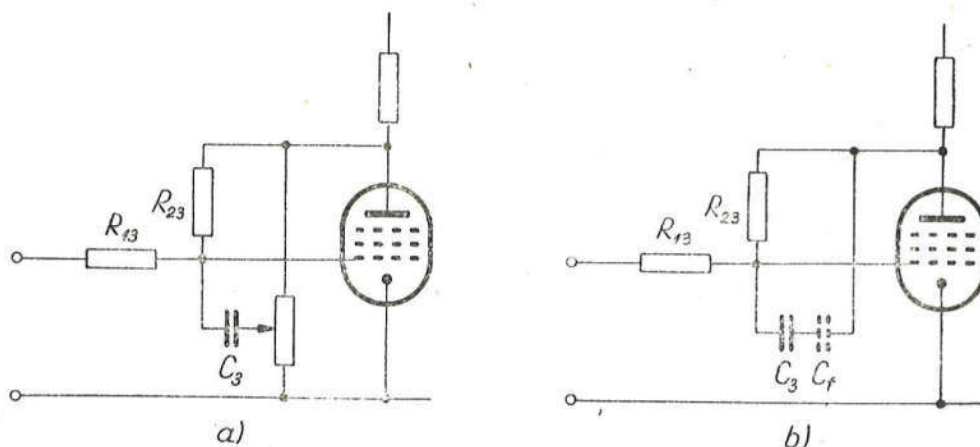
Sl. 218. Sheme uz primjer 24.

U području srednjih i niskih frekvencija kapacitet C_3 nema utjecaja. U tom području pojačanje je konstantno i ovisno o odnosu otpora R_{23}/R_{13} . Kod frekvencije, kod koje se otpor kapaciteta C_3 izjednači s otporom R_{13} , impedancija $R_{13} \parallel C_3$ postane $\sqrt{2}$ -puta manja od otpora R_{13} , što znači, da se pojačanje zapravo toliko puta povisi, to jest povisi se za 3 decibela. Izjednačenje otpora R_{13} s otporom kapaciteta C_3 određuje dakle prelaznu frekvenciju.

Dok klizač stoji sasvim na gornjem kraju potencijometra na sl. 218a, na kapacitetu vlada puni napon izvora, jer je rešetka, kao što smo već spomenuli, zbog svog malenog napona prema katodi, praktički na potencijalu katode, to jest zemlje. Pomakom klizača naniže dolazi kapacitet C_3 pod niži napon, te će kroz njega teći manja struja nego prije. Isti napon na ovom kapacitetu i istu struju mogli bismo postići i tako, da ostavimo klizač sasvim

na gornjem kraju potencijometra, ali u seriju s kapacitetom C_3 da spojimo odgovarajući kapacitet (sl. 218b), koji bi na sebe preuzeo takav napon, da na kapacitetu C_3 preostane isti napon, koji bi on imao pomakom klizača na niže. (Redukciju napona ne bismo smjeli izvršiti otporom, koji bismo spojili u seriju s kapacitetom C_3 , jer bismo time promijenili fazne odnose. Potencijometar ima relativno malen otpor, te on na fazne odnose praktički ne utječe). U grani kapaciteta imali bismo dakle dva kapaciteta spojena u seriju. Ukupni kapacitet bio bi manji od kapaciteta C_3 , što znači, da bi se prelazna frekvencija pomakla naviše. Drugim riječima: što je klizač potencijometra niže, to je umetnuti fiktivni kapacitet C_f manji, te je prelazna frekvencija viša. Ako se radi o jednoj te istoj frekvenciji, onda je izdizanje napona te frekvencije to manje, što je klizač bliže zemlji.

Prelazom klizača sasvim na desnu stranu potencijometra P_2 spaja se kapacitet C_3 paralelno otporu R_{23} . Time gornji otpor reakcione grane postane ovisan o frekvenciji. S povišenjem frekvencije ovaj se otpor smanjuje, što znači, da se izlazni napon smanjuje, to jest dolazi do prigušivanja napona visokih frekvencija. I ovdje će kroz kapacitet C_3 teći to manja struja, što je klizač niže (sl. 219a). Možemo se dakle opet poslužiti umetanjem odgovara-



Sl. 219. Sheme uz primjer 24.

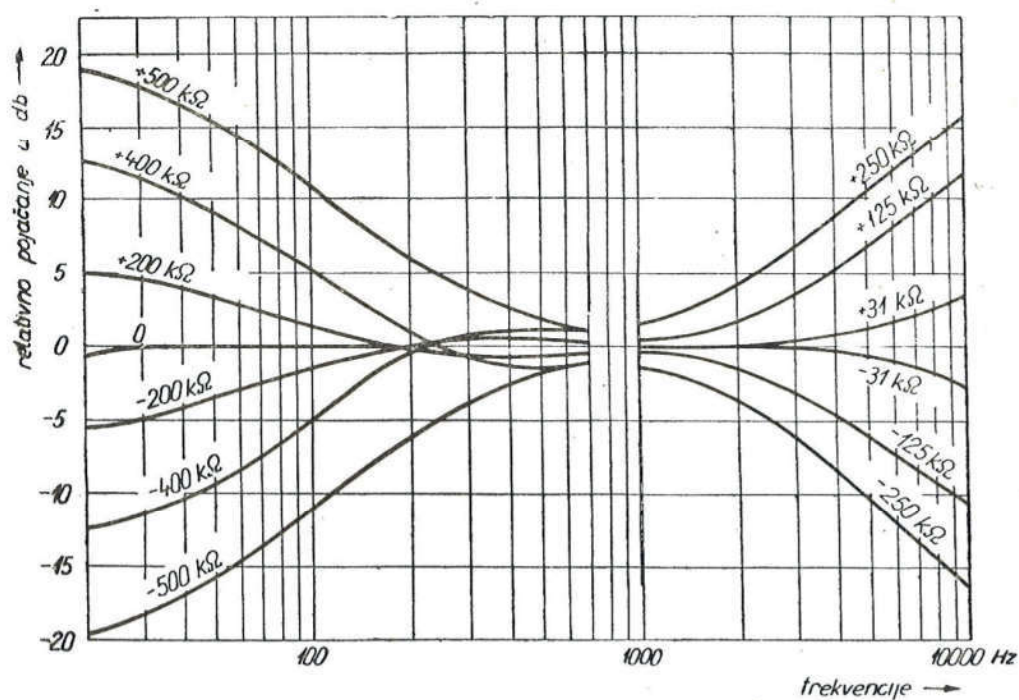
jućeg fiktivnog kapaciteta, a da pri tome klizač bude sasvim na gornjem kraju (sl. 219b). Vidimo, da je pomicanje klizača na niže i u ovom slučaju adekvatno smanjivanju kapaciteta C_3 , čime se povisuje prelazna frekvencija.

Izjednačenje kapacitivnog otpora (to jest otpora, što ga ima kapacitet C_3 spojen u seriju s fiktivnim kapacitetom C_f), s otporom R_{23} daje prelaznu frekvenciju. Kod dovoljno visoke frekvencije prevladava utjecaj ovih kapaciteta, te se naponska karakteristika spušta za 6 decibela po oktavi.

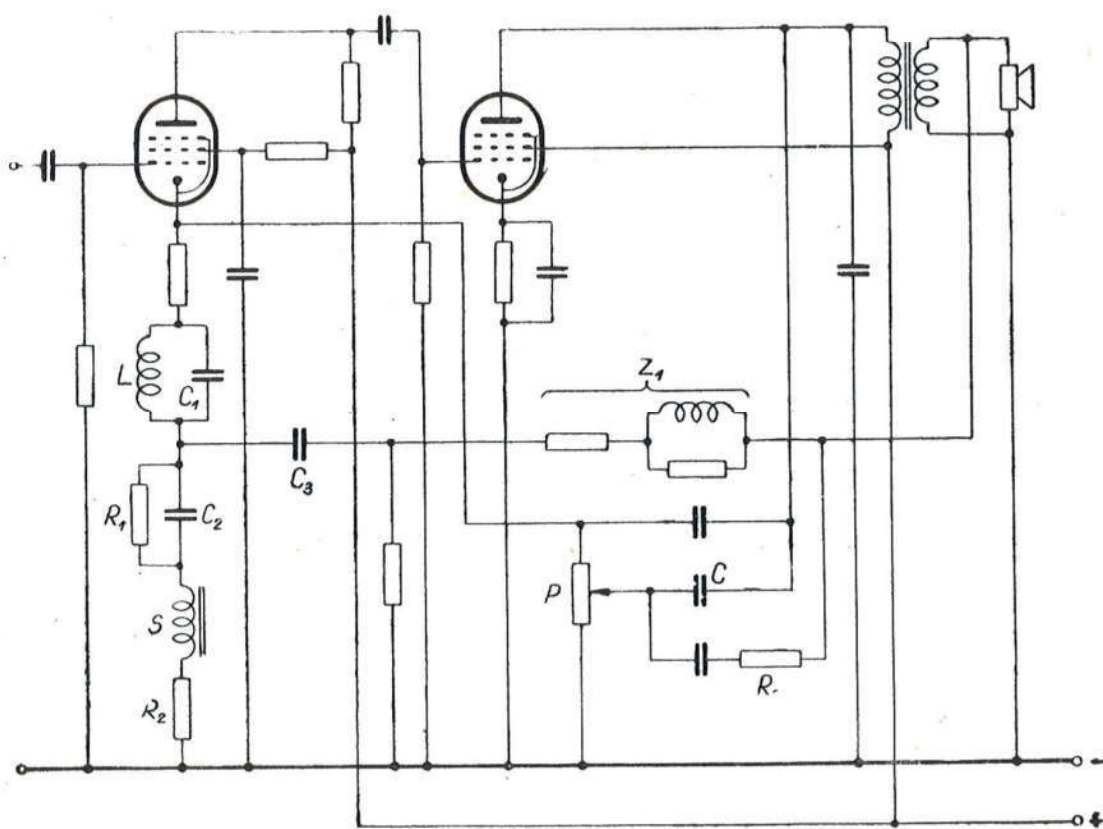
Na sl. 220. vide se prigušne karakteristike ovog sklopa.

Primjer 25. — Shema na sl. 221. prikazuje tonfrekventni dio jednog prijemnika. Ovdje je pomoću NR postignut takav oblik naponske karakteristike, da su uklonjene smetnje od bočnih pojaseva susjednih stanica i kompenzirano je prigušno izobličenje, što ga unosi zvučnik i kutija aparata.

U idealnom slučaju trebalo bi da frekventne karakteristike zvučnog tlaka, što ga proizvodi zvučnik aparata, imaju oblik, kakav vidimo na sl.

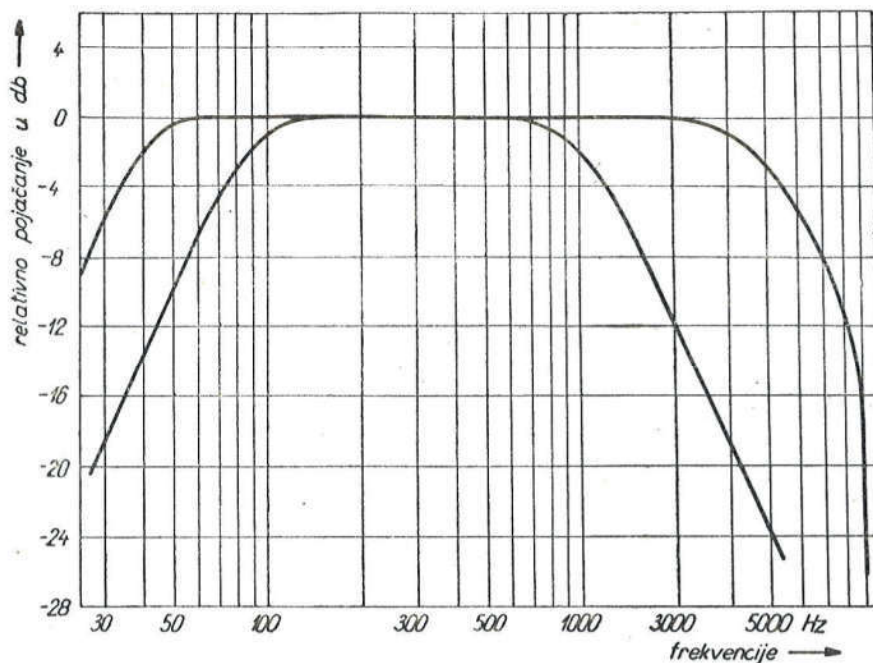


Sl. 220. Prigušne karakteristike sklopa na sl. 215.



Sl. 221. Shema sklopa uz primjer 25.

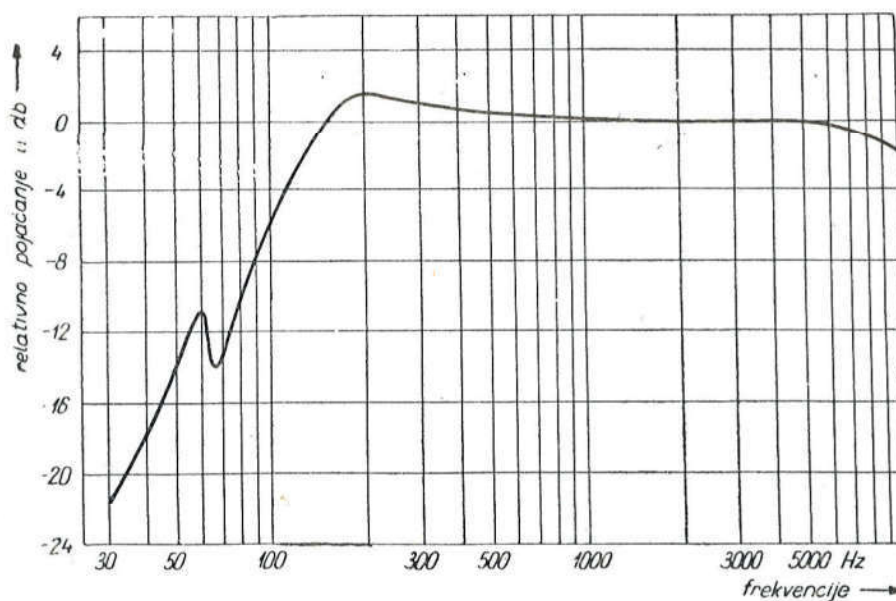
222. Visoke frekvencije morale bi biti potisnute, da se ne čuje prodiranje susjednih stanica. Kod primanja jačih stanica pojas bi mogao biti širi, ali bi karakteristika u blizini 9 kHz morala strmo padati, da se isključi interfe-



Sl. 222. Idealne akustičke prigušne karakteristike prijemnika (uz primjer 25.).

rentni ton od 9 kHz. Kako ton ne bi bio taman, potrebno je s potiskivanjem visokih frekvencija odrezati u odgovarajućoj mjeri i niske. Zato je na sl. 222. pojas frekvencija za slabije stanice obostrano uži.

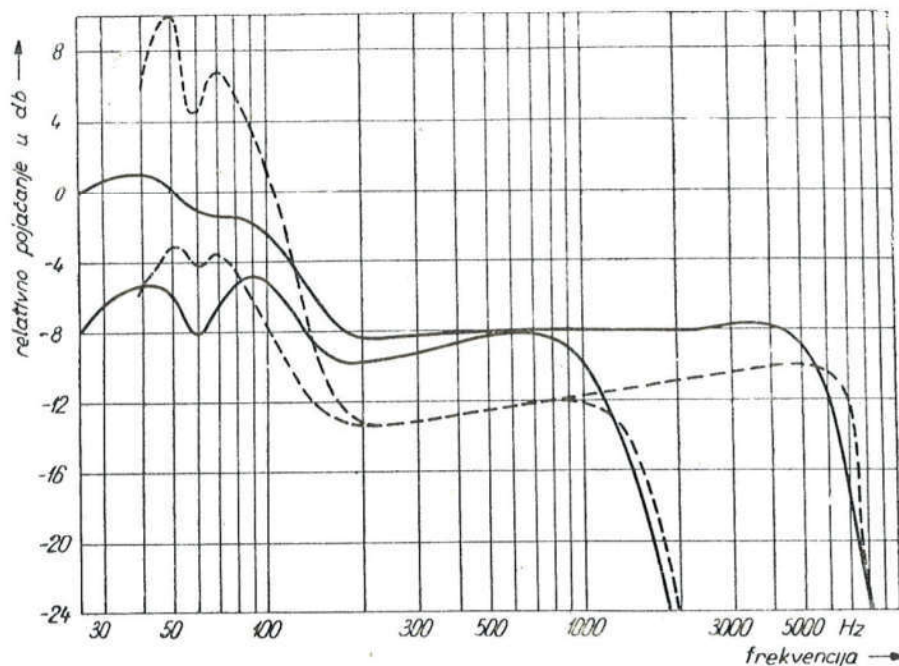
Pravi oblik tražene karakteristike može se dobiti uzimanjem u obzir karakteristike zvučnika montiranog u kutiju aparata. Iz sl. 223. se vidi, da



Sl. 223. Prigušna karakteristika zvučnika zajedno s kutijom (uz primjer 25.).

je kod srednjih i viših frekvencija karakteristika praktički horizontalna. Kod 200 Hz dolazi do izdizanja zbog rezonancije kutije. Ispod ove frekvencije karakteristika naglo pada. Pri ovom padu nastaje zbog rezonancije zvučnika još jedno izdizanje, i to kod 60 Hz.

Sl. 224. prikazuje naponske karakteristike (crtkane), koje bi morao imati tonfrekventni dio prijemnika, pa da zajedno sa zvučnikom daje idealne karakteristike sa sl. 222. Izvučene karakteristike na istoj slici su one, koje se stvarno postižu gornjim sklopom.



Sl. 224. Tražene prigušne karakteristike (crtkane) i postignute karakteristike (izvučene) tonfrekventnog dijela prijemnika.

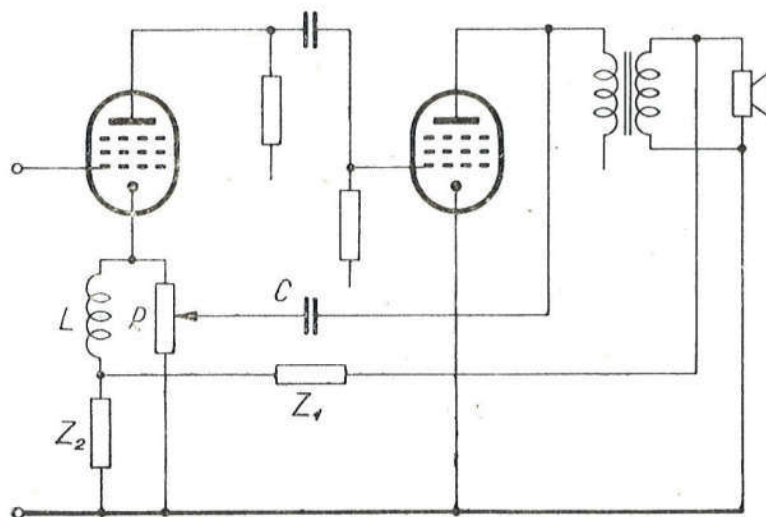
Reakcioni napon se dobiva dvostrukim putem: sa primara i sa sekundara transformatora. Pogledajmo pojednostavljenu shemu na sl. 225. Kod niskih frekvencija djeluje samo napon sa sekundara, jer je za te frekvencije kapacitet C premalen, a da bi mogao djelovati napon sa primara. Napon sa sekundara dijeli se preko impedancija Z_1 i Z_2 na dva dijela, od kojih napon sa Z_2 djeluje kao reakcioni napon u rešetkinom krugu prve elektronke.

Impedancije Z_1 i Z_2 su takve, da s porastom frekvencije NR pomalo opada, te se karakteristika diže. No sada nastupa NR preko druge grane. Ova NR uzrokuje opadanje karakteristike, i to zbog toga, što induktivni otpor induktiviteta L s porastom frekvencije raste, a kapacitivni otpor kapaciteta C opada.

Potenciometar P omogućuje, da se karakteristika u području visokih frekvencija može mijenjati. Kad je klizač sasvim dolje, nema NR s primara. Ako se pomakne sasvim gore, NR je maksimalna, odnosno pojas frekvencija je najuži.

Sada ćemo se vratiti na potpunu shemu na sl. 221. Induktivitet L s kapacitetom C_1 predstavlja titrajni krug ugođen na 9 kHz. Za ovu frekvenciju NR

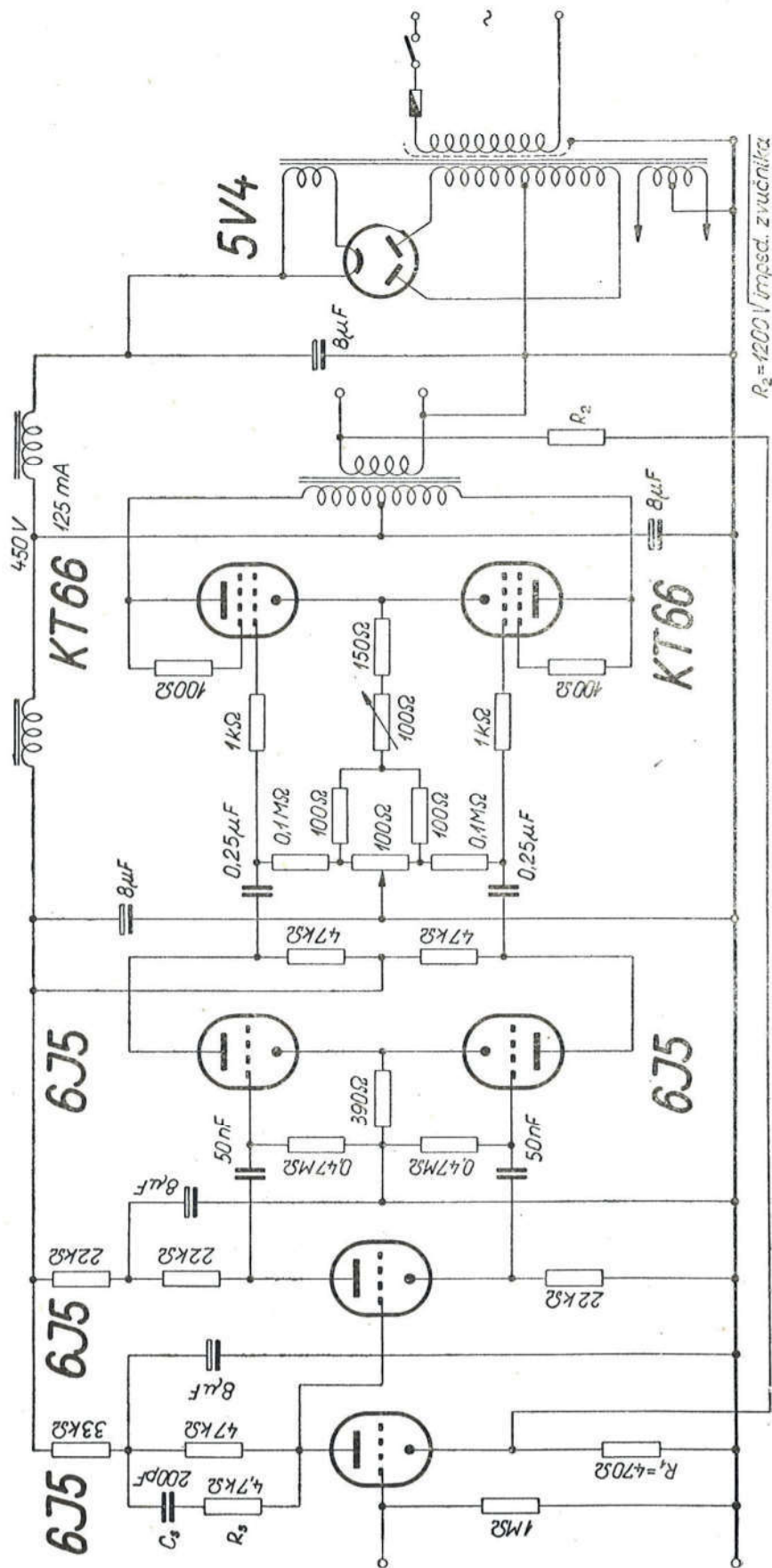
je vrlo jaka, čime se postiže potiskivanje ovog tona. Otpor R_1 zajedno s ostalim otporima između katode i zemlje određuje prednapon rešetke. Kapacitet C_2 čini s induktivitetom S serijski titrajni krug. Rezonantna frekvencija ovog titrajnog kruga leži oko 50 Hz. Kod ove frekvencije djeluje samo otpor R_2 , te je NR malena, odnosno pojačanje najveće. Iza rezonantne frekvencije prevladava u C_2S -krugu induktivna komponenta, koja s kapacitetom C_3 daje novu rezonantnu frekvenciju nešto iznad rezonantne frekvencije kutije. Kako se u ovom slučaju napon za NR dobiva s induktivnog elementa serijskog titrajnog kruga, to je ovaj napon visok, odnosno NR jaka, te dolazi do udubljenja na karakteristici. Otpor R_2 prigušuje krug i određuje veličinu udubljenja. Pomoću otpora R_3 povezuje se sekundarna grana s primarnom, čime se prilikom regulacije NR-e utječe i na niske frekvencije. Kao što je u početku rečeno, potrebno je s potiskivanjem visokih tonova potisnuti i sasvim niske, a to je omogućeno ovom vezom.



Sl. 225. Pojednostavljena shema sklopa sa sl. 221.

Primjer 26. — Ovo 15-vatno pojačalo (opisano u časopisu *Wireless World*, august 1949, u članku D. T. N. Williamson-a: High-quality amplifier, new version) ima četiri stupnja, i u svim stupnjevima upotrebljene su triode. (sl. 226.). Da bi se uklonio jedan od elemenata koji zakreću fazu, spojen je prvi stupanj s drugim direktno, bez kondenzatora. Obrtač faze je drugi, a ne treći stupanj, jer na taj način obrtač faze radi s manjim izmjeničnim naponima, te manje izobličuje. Protufazni stupnjevi nemaju premoštene katodne otpore, čime se postiže automatsko simetriranje izmjeničnih napona. U petlju NR uključeno je cijelo pojačalo, od sekundara izlaznog transformatora do rešetke prvog stupnja. NR iznosi 20 decibela. Puna izlazna snaga dobiva se uz ulazni napon od 1,9 volta.

U ovom pojačalu naročito kritičan element je izlazni transformator. Da bi se dobila jaka NR i u području od 10 do 20 Hz, treba da je pojačanje unutar petlje NR i u tom području frekvencija veliko. To znači, da primarni induktivitet mora biti velik. Kako je induktivitet ovisan o veličini signala (s porastom signala raste), to ga treba dimenzionirati prema najkritičnijem slučaju. Ovdje je to slučaj minimalnog signala, jer su fiksne vremenske konstante (RC-



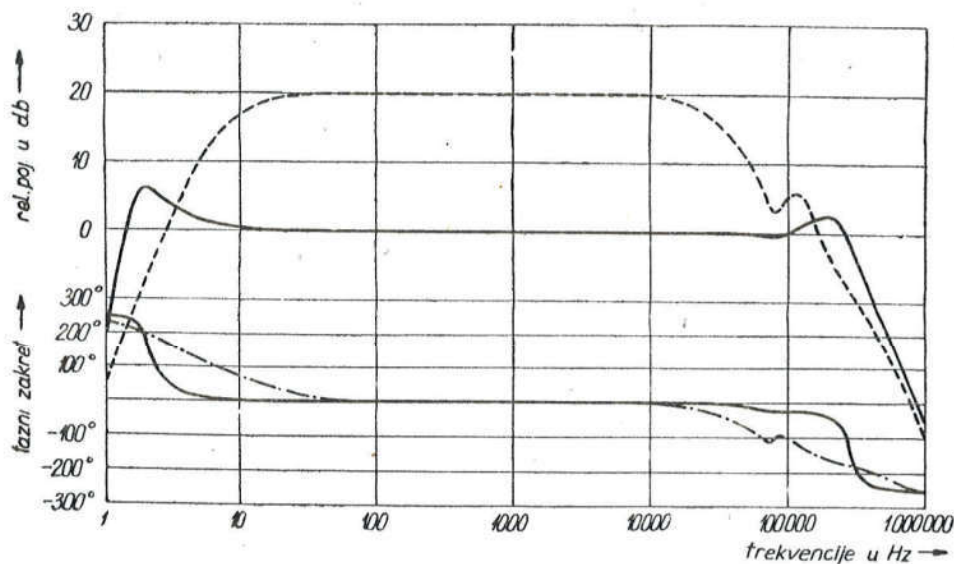
Sl. 226. Shema pojačala uz primjer 26.

konstante) manje od promjenljive (od L/R-konstante). S povećavanjem signala stabilnost se na taj način povećava, je se povećava razlika među konstantama. Kontrola početnog permeabiliteta može se provesti priključivanjem primara na 5-voltni žarni namot za ispravljačicu. Uz frekvenciju mreže od 50 Hz re smije struja magnetiziranja iznositi više od 150 mikroampera. Transformator sa strujom od 200 mikroampera već ne dolazi u obzir.

Namot transformatora izveden je u dva dijela. Svaki dio sastoji se od devet cilindričnih svitaka, od kojih neparni svici pripadaju primaru, a parni sekundaru. Svaki neparni svitak ima po 440 zavoja lakirane bakrene žice 30 s. w. g., a svaki parni svitak po 84 zavoja žice 22 s. w. g. Svici primara spojeni su u seriju, a sekundara paralelno, čime se dobiva odnos zavoja 52,5 : 1, odnosno transformacija otpora od 10.000 oma (koliko iznosi optimalni opterećeni otpor izlaznih elektronki) na otpor od 3,6 oma. Spajanjem sekundarnih svitaka u seriju i paralelno mogu se dobiti i drugačiji otpori. Za transformator je upotrebljen specijalni sicilijski lim, koji ima veliku početnu permeabilnost (28A Super Silkor — M. & E. A.). Visina paketa lima je 42 milimetra.

Kritična je vrijednost vremenskih konstanti veznih RC-elemenata. Ukoliko je koja od njih veća za više od 20% od nominalne, treba je promjenom elemenata ugoditi na pravu vrijednost.

Kao što vidimo, osiguranje od oscilacija je minimalno. Zato konstante sastavnih elemenata moraju imati točno određene vrijednosti. To se tiče također elektronki, koje ne smiju imati strminu veću od prosječne. Ako je strmina veća, treba povećati gornji otpor reakcione grane (otpor R_2). Pojačanje unutar petlje NR treba, naime, da u području između 30 Hz i 10 kHz bude 10.



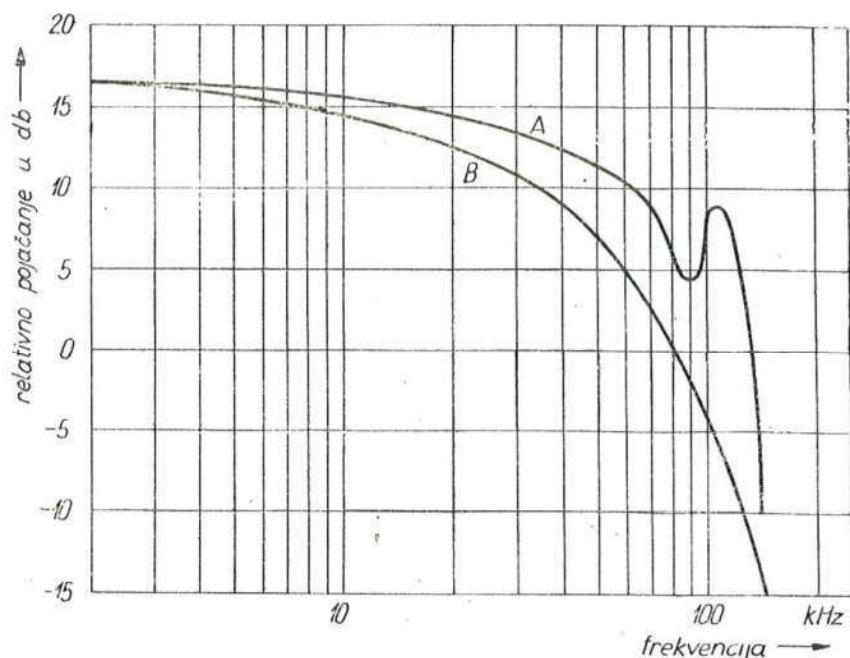
Sl. 227. Prigušne i fazne karakteristike pojačala sa sl. 226.

Važno je također izjednačiti struje mirovanja izlaznih elektronki, jer predmagnetiziranje smanjuje početni induktivitet.

U području visokih frekvencija stabilnost je osigurana RC-elementom ($R_s - C_s$), koji je spojen paralelno prvoj elektronki. Ovaj element smanji pojačanje u petlji NR iznad 20 kHz, i bez utjecaja je u kritičnom području.

Iz sl. 227., koja prikazuje ovisnost napona i faze o frekvenciji, vidi se, da ovo pojačalo u području između 10 Hz i 100 kHz praktički nema prigušnog izobličenja.

Primjer 27. — Pojačalo, opis kojeg ćemo ukratko prenijeti (opisano u časopisu *Electronic Engineering*, august 1952, u članku E. J. Miller-a: A stable, high quality, power amplifier) konstruirano je za serijsku proizvodnju. U takvoj proizvodnji najosjetljiviji elemenat je izlazni transformator, jer nije lako postići, da svi transformatori budu u električkom pogledu jednaki. Osim toga transformatori visoke kvalitete su skupi. No problem NR kod pojačala ne mora uvijek biti u vezi s izlaznim transformatorom. Drugim riječima: upotreba visokokvalitetnog izlaznog transformatora ne predstavlja uvijek najbolje rješenje, kad je u pitanju stabilnost pojačala u NR. Na sl. 228. karakteristika A pripada visokokvalitetnom transformatoru s jezgrom od mumetala, a krivulja B se odnosi na transformator s jezgrom od silicijskog lima. Kod prve karakteristike vidi se rezonantno izdizanje u blizini frekvencije od 100

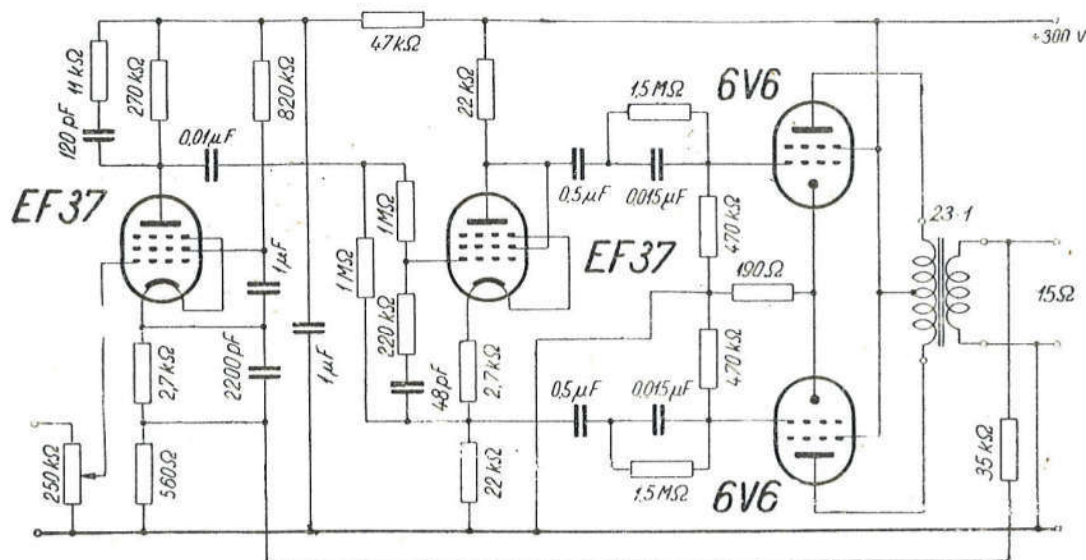


Sl. 228. Prigušne karakteristike izlaznih transformatora (uz primjer 27.).

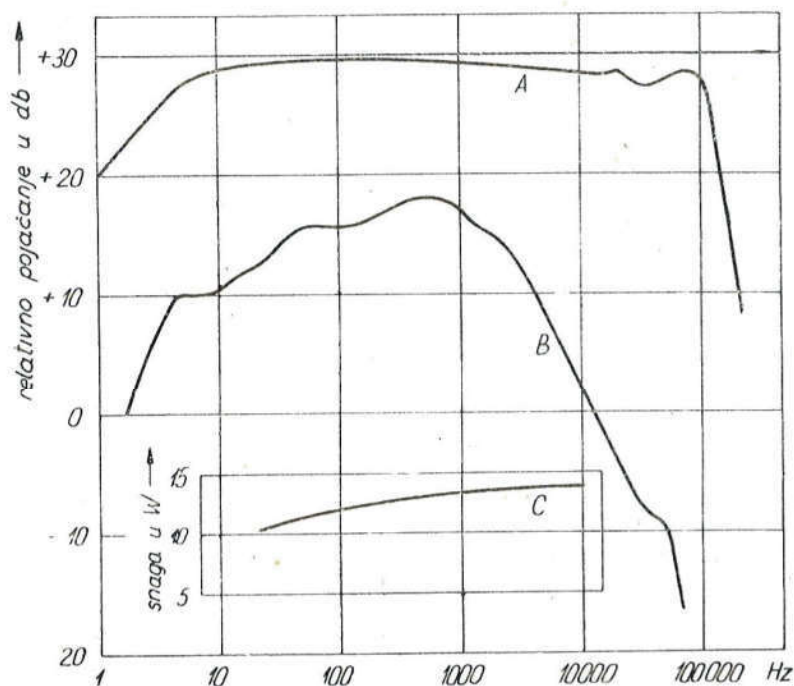
kHz, dok kod druge krivulje toga nema. Zato je za pojačalo sagrađeno prema shemi na sl. 229. odabran ovaj drugi transformator. No dobitak u vezi s rješavanjem problema stabilnosti plaća se kvalitetom NR. Karakteristika B počinje padati rano i pada brzo, što znači, da će u tom području frekvencija NR biti slabija, odnosno da ne će biti konstantna za cijelo tonsko područje. Karakteristika reakcionog napona vidi se na sl. 230. (krivulja B). Već kod frekvencije od 5 kHz reakcioni napon je za 8 decibela niži od vrijednosti kod 1 kHz. Sve do 30 kHz karakteristika pada s nagibom manjim od 10 decibela po oktavi. Ovo je postignuto RC-elementom spojenim paralelno anodnom otporu prve elektronke i RC-elementom u rešetkinom krugu druge elektronke. Iza 30 kHz pa do 60 kHz slijedi lagana stepenica, što je odbiveno kapacitetom, koji je spojen paralelno katodnom otporu prve elektronke. U području iznad

60 kHz tok karakteristike ovisi o transformatoru i pada sa 18 decibela po oktavi.

Mjerenjem je ustanovljeno, da u području niskih frekvencija reakcioni napon ne pada brže od 6 decibela po oktavi. No zbog eventualne nesimetrije



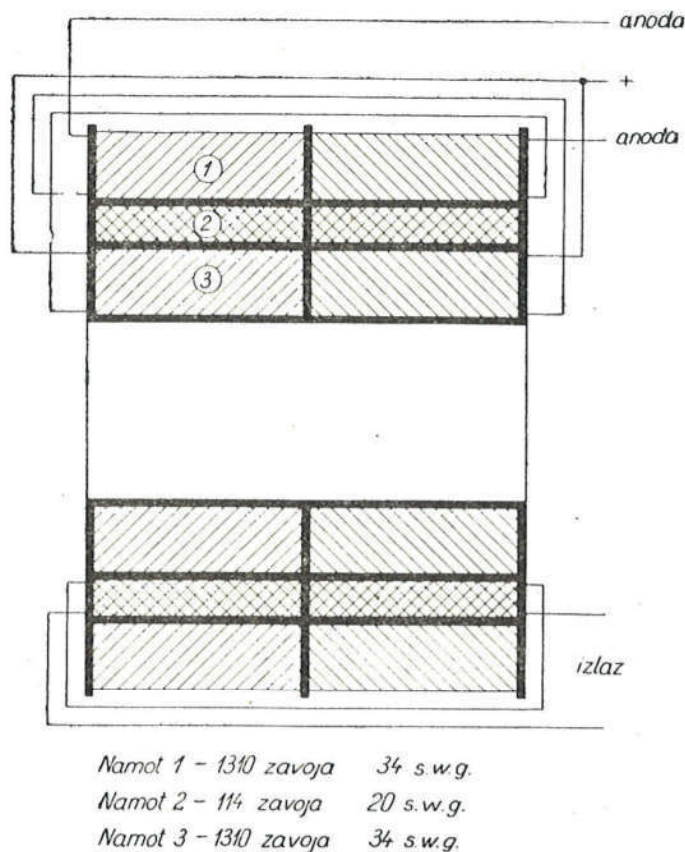
Sl. 229. Shema pojačala uz primjer 27.



Sl. 230. Prigušne karakteristike pojačala sa sl. 229.

u izlaznom stupnju moglo bi doći do strmijeg pada karakteristike, te su za svaki slučaj umetnuti stabilizacioni RC-elementi u rešetkine krugove izlaznih elektronki.

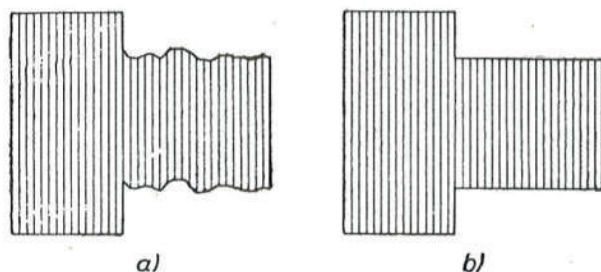
Iz dijagrama na sl. 230. vidi se (krivulja A), da se karakteristika izlaznog napona pojačala nalazi unutar ± 3 decibela u području od 4 Hz do 100 kHz, odnosno unutar ± 1 decibel od 10 Hz do 20 kHz. Stupanj NR je kod viših frekvencija manji, ali u području, gdje je to važno zbog rezonancije zvučnika, NR djeluje gotovo u punoj vrijednosti.



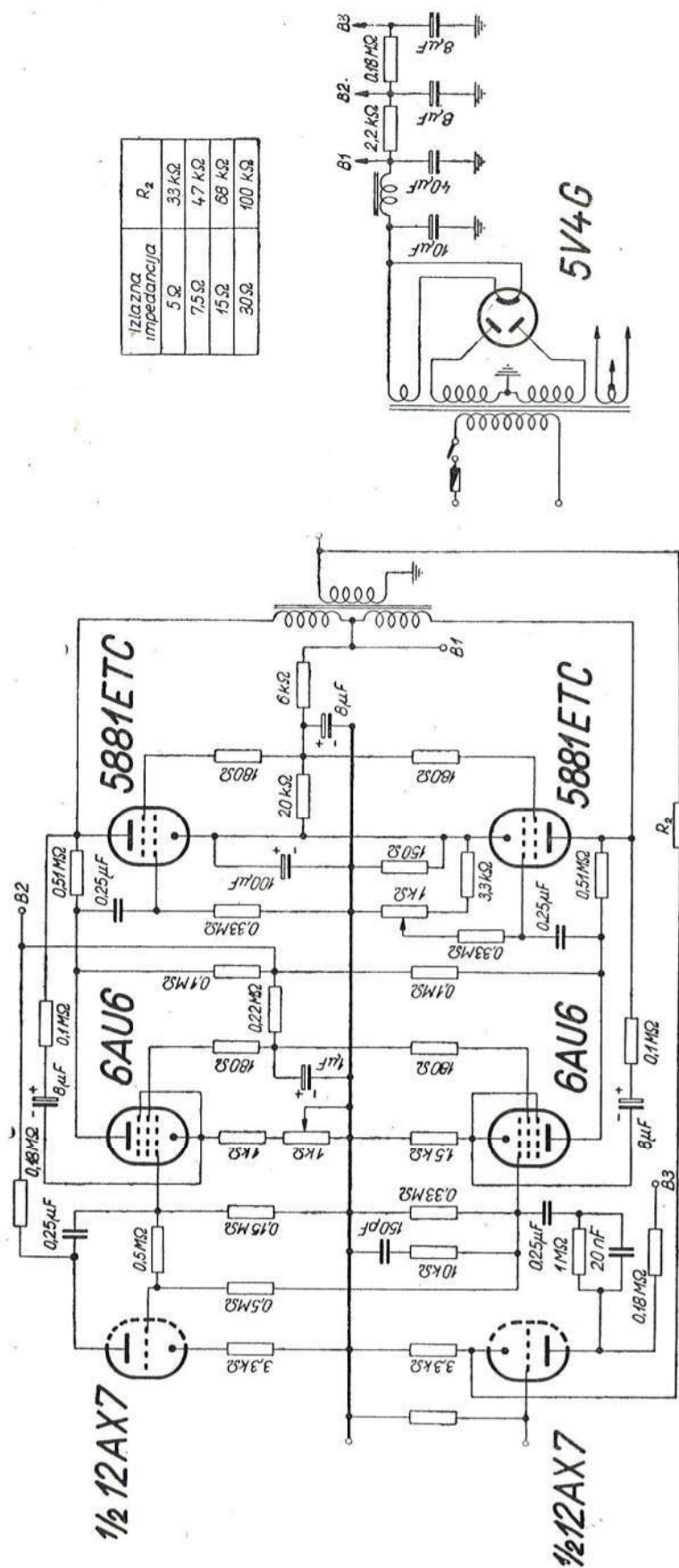
Sl. 231. Način namatanja izlaznog transformatora za pojačalo sa sl. 229.

Sl. 231. prikazuje, kako je izveden namot transformatora. Naznačeni broj zavoja odnosi se na opteretnu impedanciju od 15 oma.

Primjer 28. — Pojačalo Williamson-ova tipa (vidi primjer 26.) ima nedostatak u tome, što kod ekstremnih frekvencija — u infrazvučnom i u ultra-zvučnom području — dolazi do pozitivne reakcije, pa prema tome do nestabilnosti. Ova se nestabilnost očituje, na primjer, u slučaju, kad se nivo nekog stalnog tonskog napona naglo spusti za kojih 30 decibela. Tada dolazi do prelaznog pojava, kakav se vidi u oscilogramu na sl. 232.



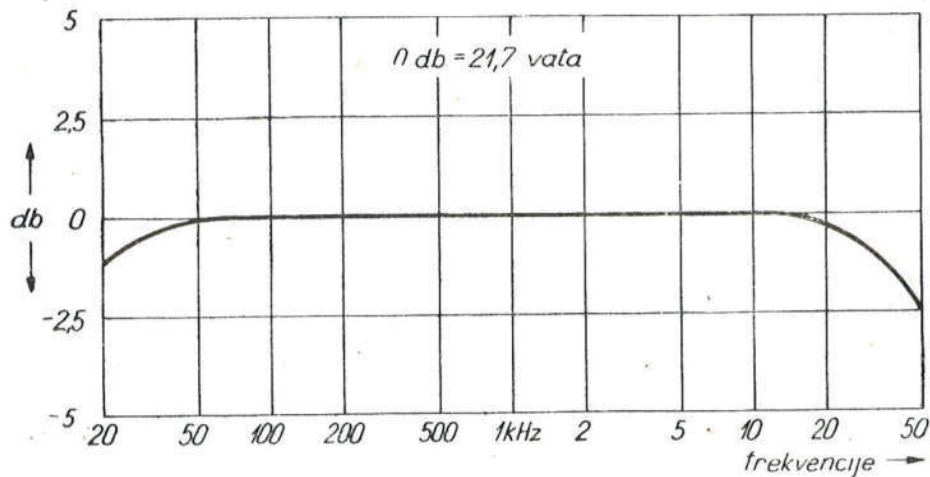
Sl. 232. a) Naglim spuštanjem tonfrekventnog napona dolazi kod pojačala sa sl. 226. do prelaznog pojava. b) Kod pojačala sa sl. 233. toga pojava nema.



Sl. 233. Shema pojačala uz primjer 28.

Uz kapacitivno opterećenje dolazi do nestabilnosti u ultrazvučnom području. Pravokutni napon visoke tonske frekvencije dobiva na svom vrhu oscilacije u ritmu frekvencije od nekoliko stotina kiloherca.

Kod pojačala »UTC Linear Standard Amplifier, Model MLF« (United Transformer Co.) ovakve se nestabilnosti ne pojavljuju, odnosno svedene su na najmanju mjeru. Ovdje je NR izvedena s tri petlje (sl. 233.). Spajanjem anoda izlaznog i prethodnog stupnja pomoću otpora od $0,51 \text{ M}\Omega$ primijenjena je NR od 12 decibela kod izlaznog stupnja samog. Otpor od $0,1 \text{ M}\Omega$ veže preko kapaciteta od $8 \mu\text{F}$ anodu izlaznog stupnja s katodom prethodnog, čime se u NR od 12 decibela uključuju oba ova stupnja zajedno. Treća petlja NR izvedena je spajanjem sekundara izlaznog transformatora s katodom prvog stupnja. Ova NR iznosi također 12 decibela. Prema tome totalno smanjenje pojačanja NR-om iznosi 36 decibela.



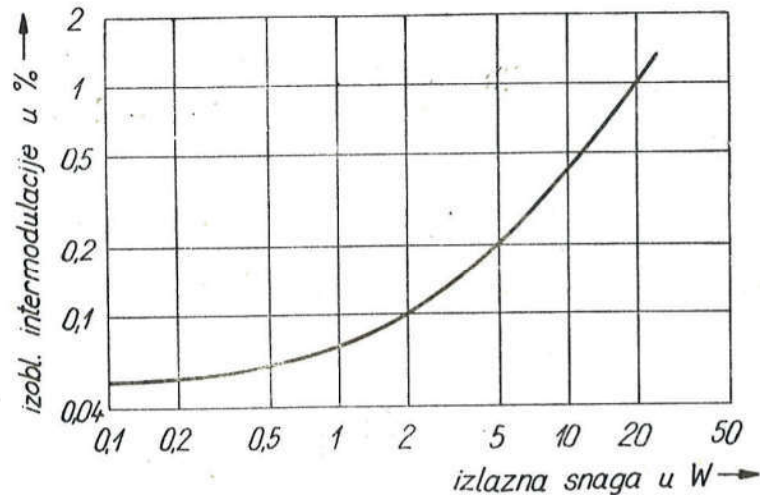
Sl. 234. Prigušna karakteristika snage kod pojačala sa sl. 233.

Između prvog i drugog stupnja umetnuti su korekcionni elementi za stabiliziranje u području niskih i visokih frekvencija. Za obrtanje faze upotrijebljena je posebna cijev, koja se nalazi u strujnoj i naponskoj NR. Naponska NR je jaka, i to takva, da je pojačanje ove elektronke jednako jedinici.

Uz ulazni signal od 0,24 volta dobiva se izlazna snaga od 1 vata. Iz dijagrama na sl. 234. vidi se ovisnost izlazne snage o frekvenciji, a iz dijagrama na sl. 233. ovisnost izobličenja intermodulacije o izlaznoj snazi. Još kod snage od 20 vata intermodulacija iznosi samo 1%, što odgovara faktoru izobličenja od kojih 0,25%.

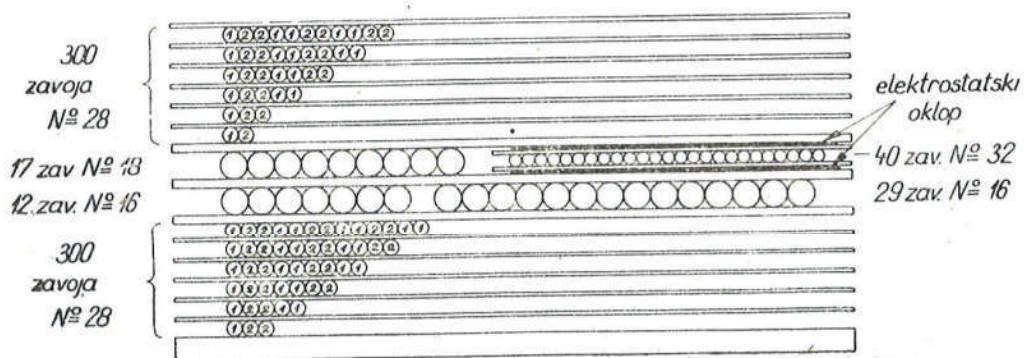
Primjer 29. — Ovdje se radi o 50-vatnom pojačalu u klasi B₁ (opisano u časopisu *Electronics*, oktobar 1954, u članku A. B. Bereskin-a: Fifty-watt amplifier for high-quality audio). Kod izlaznog transformatora ovog pojačala na poseban način je riješen problem što manjeg rasipanja i što manjeg kapaciteta između polovina primara. Primarni namot ima četiri dijela, od kojih su po dvije četvrtine motane bifilarno, kao što pokazuje sl. 236. Da bi kapacitet bio što manji, obje žice su kod svakog zavoja zaokrenute, čime se kapacitet smanji za trećinu u odnosu na slučaj bez okretanja žica. Kod transformatora izvedenog prema sl. 236., kapacitet iznosi 10 nanofarada. Posebno pitanje je

napon između žica. Ako vršni napon na svakoj četvrtini primara iznosi 250 volta, onda će između bifilarnih zavoja vladati vršni napon od 500 volta, što predstavlja veliko opterećenje za izolacione materijale. Pri tome treba imati u vidu da upotreba izolacionih lakova i smola povećava kapacitete transformatora. Sekundar je izveden za opteretne impedancije od 4, 8 i 16 oma. Posebno je dodan tercijarni svitak od 40 zavoja za NR. Ovaj je svitak statički zaštićen



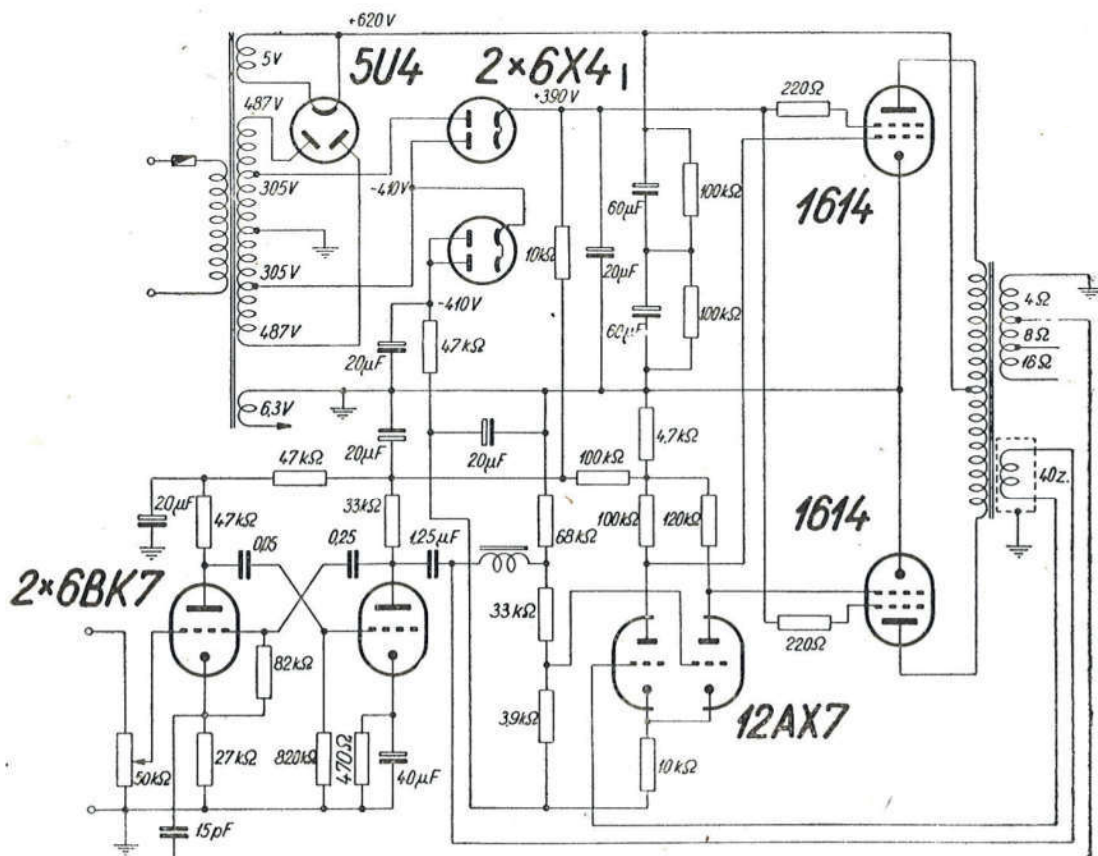
Sl. 235. Karakteristika izobličenja intermodulacije kod pojačala sa sl. 233.

i magnetski čvrsto vezan sa sekundarom. Za jezgru je upotrebljen lim »Hipersil C«. Ako bi se transformator gradio s običnim silicijskim limom, onda bi uz iste karakteristike u području niskih frekvencija trebalo broj zavoja povećati za četvrtinu, čime bi se kapacitet povećao za polovinu.

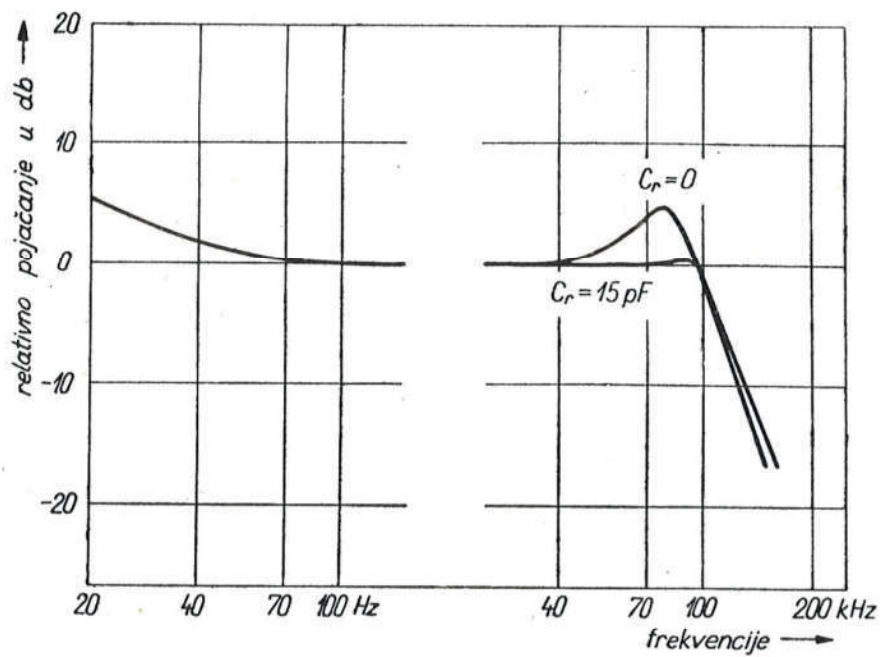


Sl. 236. Način namatanja izlaznog transformatora za pojačalo sa sl. 237.

Prvi i drugi stupanj pojačala (sl. 237.) ima NR od anode na katodu. Kapacitet od $1,25 \mu\text{F}$ i prigušnica daju rezonantno izdizanje u području između 10 i 15 Hz. Sa oklopljenog tercijara dolazi reakcioni napon u rešetkin krug pogonskog stupnja. Statički oklop omogućuje primjenu jače NR. Do nestabilnosti ne dolazi ni kod NR od 36 decibela. Kako ne bi bio potreban suviše visok pogonski napon, pojačalo normalno radi s 24 decibela tercijarne NR. Sa 4-omskog sekundarnog odvojka odveden je reakcioni napon preko

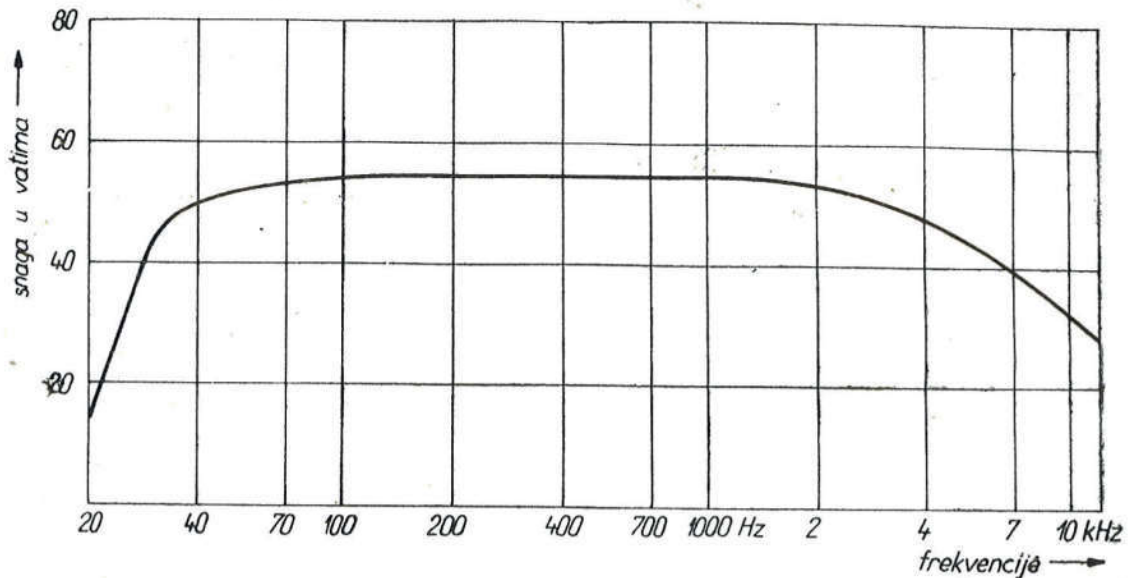


Sl. 237. Shema pojačala uz primjer 29.



Sl. 238. Prigušna karakteristika izlaznog napona kod pojačala sa sl. 237.

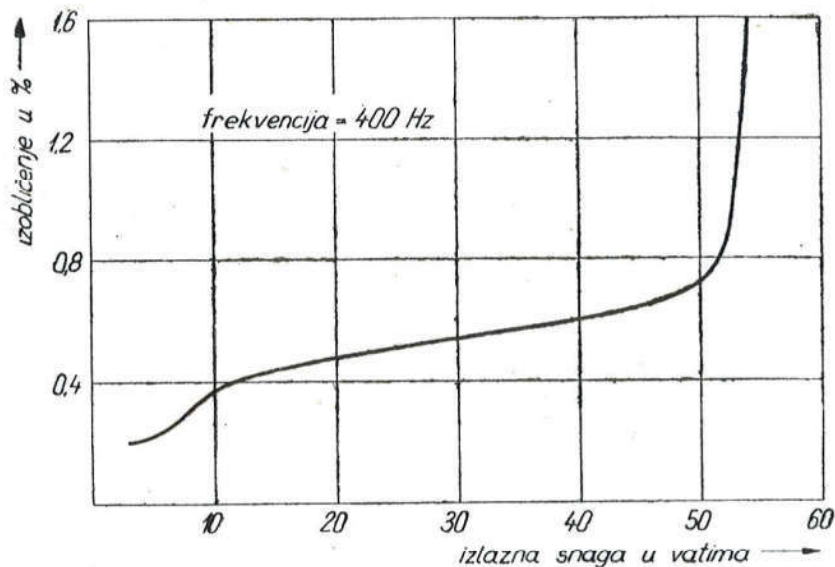
kapaciteta od 15 pF na katodu prvog stupnja. Zadatak je ove reakcije, da spriječi utitravanje na frekvenciji od približno 100 kHz. Na sl. 238. prikazana je frekventna karakteristika napona, a na sl. 239. frekventna karakteristika snage. Ovisnost faktora izobličenja o izlaznoj snazi vidi se na sl. 240.



Sl. 239. Prigušna karakteristika izlazne snage kod pojačala sa sl. 237.

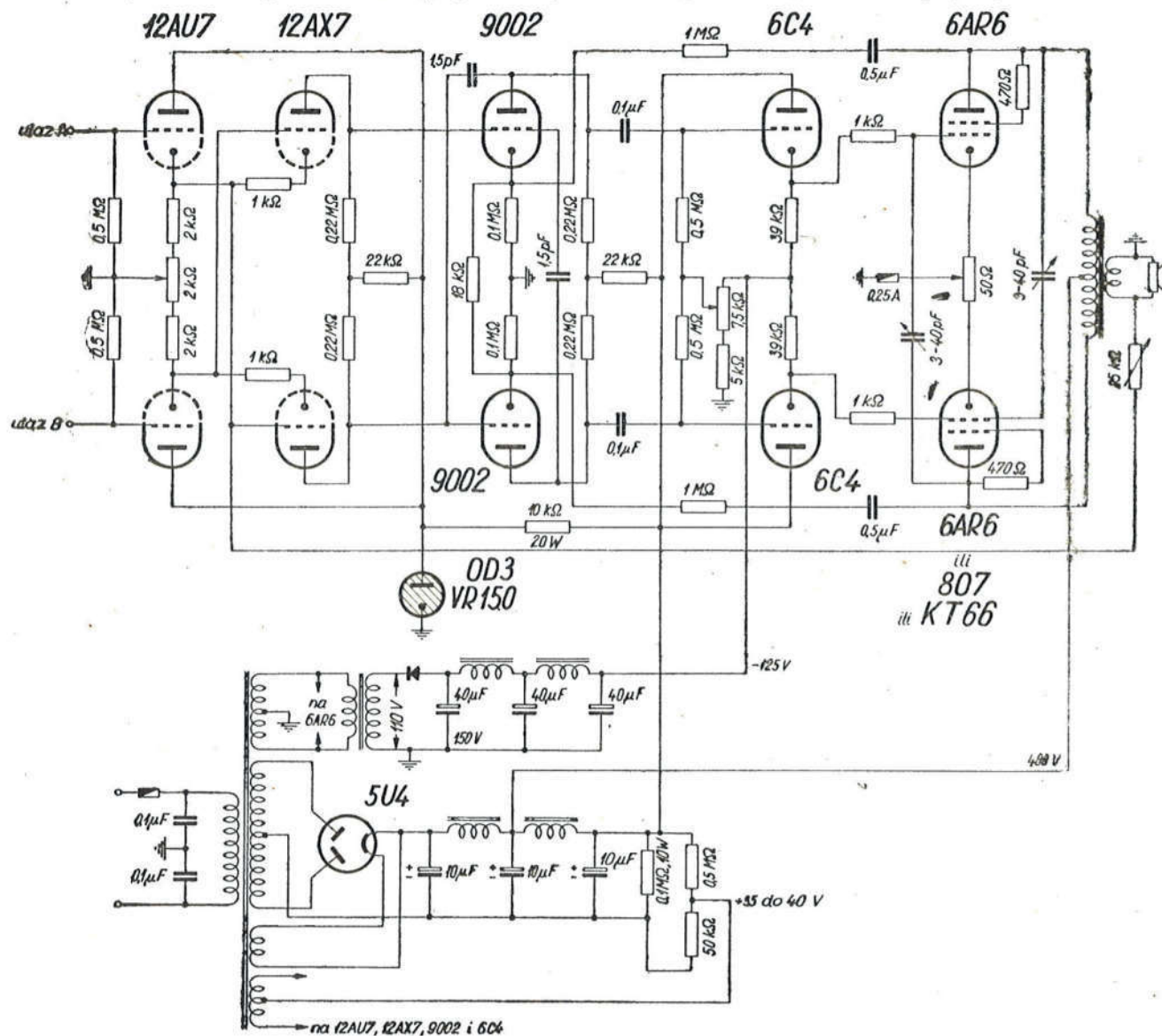
Puna izlazna snaga od 50 vata dobiva se kod ovog pojačala uz ulazni napon od 0,8 volta.

Primjer 30. — Kod ovog pojačala (opisano u časopisu *Audio Engineering*, januar 1954, u članku J. Marshall-a: The new golden-ear amplifier) išlo se za tim, da svaki stupanj bude tako konstruiran, da ima što manja izobličenja. Cijelo pojačalo sastoji se od dva istosmjerna protufazna pojačala, koja su



Sl. 240. Karakteristika harmoničkog izobličenja pojačala sa sl. 237.

međusobno vezana CR-spojem (sl. 241.). Ulazni stupanj je katodno pojačalo iskorišteno kao ukršteno-spojeni obrtač faze. Pojačalo ima dva nesimetrična ulaza ili jedan simetrični. Kod trećeg i izlaznog stupnja provedena je neutralizacija dinamičkih kapaciteta. Da bi štetni kapaciteti bili što manji, upotrebljene su u prva tri stupnja minijature cijevi. Napon za napajanje anoda



Sl. 241. Shema pojačala uz primjer 30.

prvih dvaju stupnjeva stabiliziran je tinjalicom. Izlazni transformator je vrlo visoke kvalitete. NR ima dvije petlje. Prva petlja je izvedena spojem anode izlaznog stupnja s katodom trećeg stupnja, dok reakciona grana druge petlje ide od sekundara transformatora na katodu prvog stupnja. Pojačalo je tako stabilno, da tek kod stopostotne NR oscilira, i to na niskim frekvencijama sa 20 do 40 titraja na minutu.

Naponska karakteristika je horizontala od nekoliko herca do stotinu kiloherca. Faktor harmoničkog izobličenja i intermodulacije tako je malen, da se može normalno mjeriti tek kod ekstremnih frekvencija, gdje naponska karakteristika pada za nekoliko decibela.

GLAVA ŠESTA

Mjerenja na izvedenim pojačalima

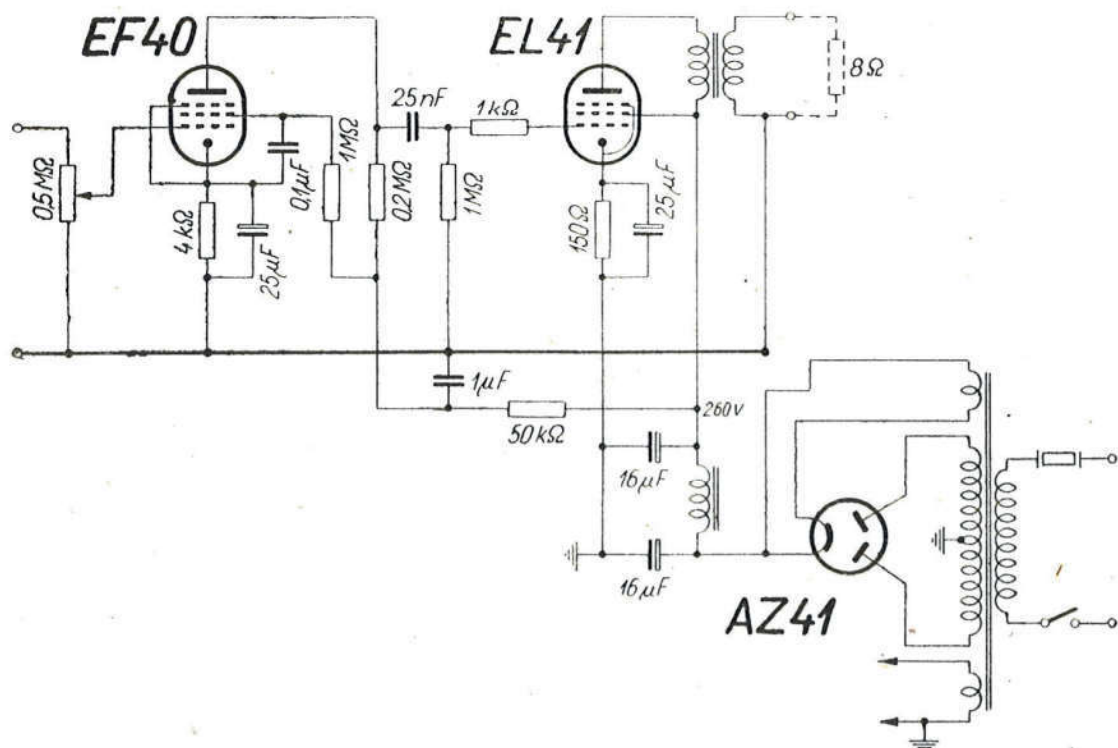
Za gradnju su odabrana četiri tipična predstavnika tonfrekventnih pojačala:

1. **Tro-vatno pojačalo**, koje može služiti kao tonfrekventni dio prijemnika ili kao izlazno pojačalo male snage za gramofonsku reprodukciju.
2. **Korekciono pretpojačalo**, koje omogućuje izdizanje i spuštanje napona niskih i visokih frekvencija.
3. **Visokokvalitetno deset-vatno izlazno pojačalo** za pogon visokokvalitetnog zvučnika.
4. **Širokopojasno pojačalo**, koje se može upotrebiti za elektronski voltmetar.

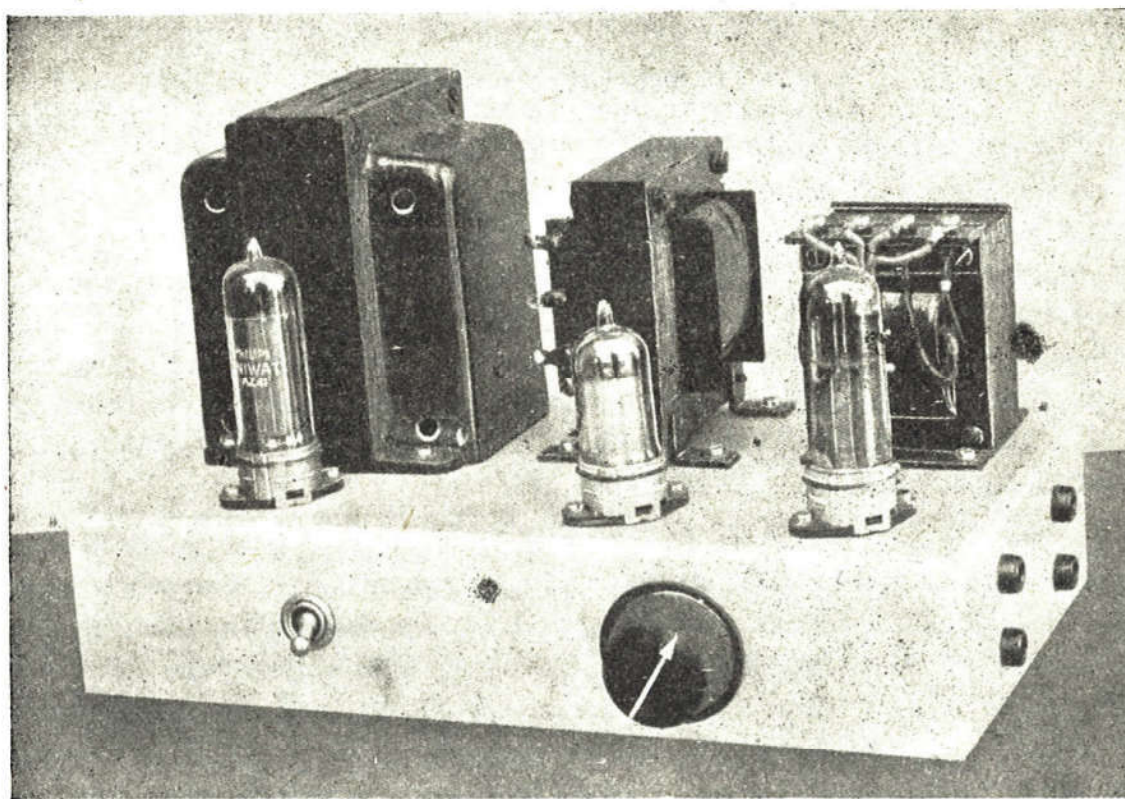
1. Tro-vatno pojačalo

Shemu ovog dvostepenog pojačala bez primijenjene NR prikazuje sl. 242. U pojačalu su upotrebljene cijevi EF 40 i EL 41. Ulaz je visokoomski, tako da se na pojačalo može priključiti kristalna gramofonska zvučnica ili izlaz iza demodulatora prijemnika. Izlazni transformator ima odnos zavoja za opteretnu impedanciju od 8 oma, koliko kod 1000 Hz iznosi impedancija predviđenog zvučnika. Na izlazu je upotrebljen isti transformator, koji je dan kao primjer proračunavanja u piščevoj knjizi »Transformatori i prigušnice« (str. 108). Izlazna snaga od 3 vata dobiva se uz ulazni napon od 27 mV (bez NR). Vanjski izgled pojačala vidi se na sl. 243.

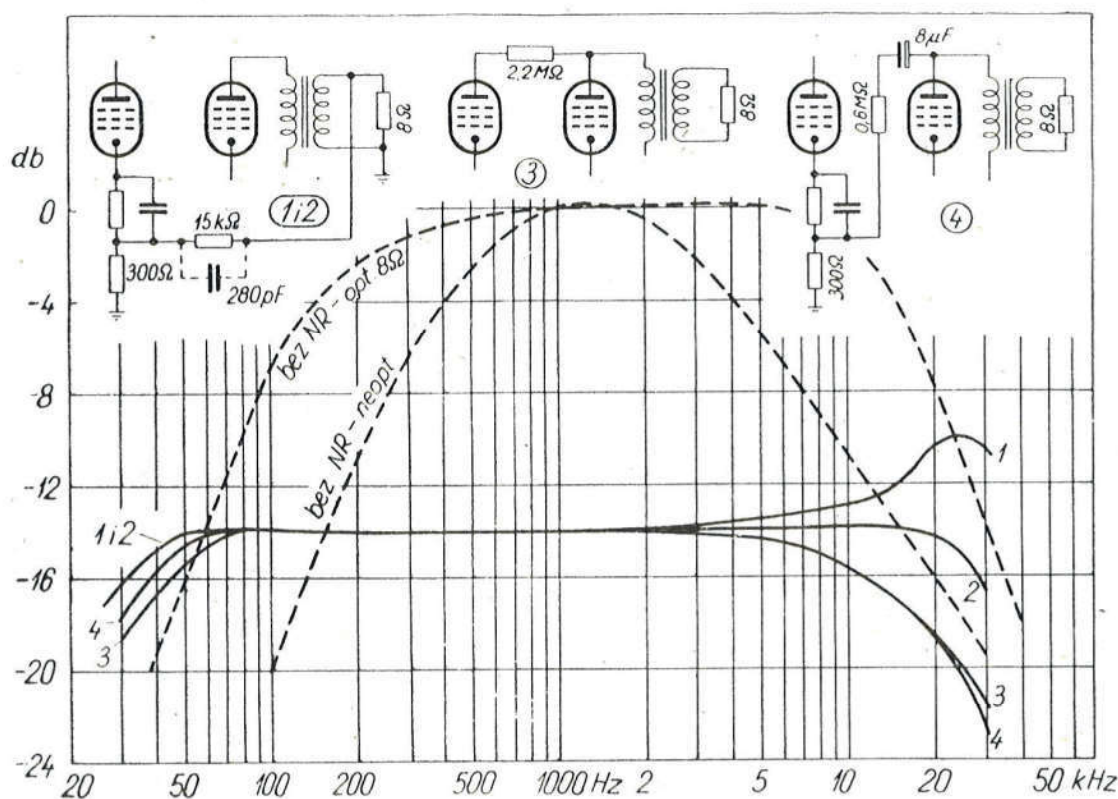
Mjerenja su izvršena sa NR primijenjenom na tri načina: pomoću otpora od anode do anode, pomoću otpora spojenog između anode izlazne elektronke i katode ulazne elektronke, i dovođenjem napona sa sekundara transformatora na katodu ulazne elektronke. Kad je pojačalo upotrebljeno kao korekciono, primijenjen je kompleksni djelitelj napona za NR od anode do anode, odnosno od anode izlazne na katodu prethodne elektronke. Uz svaki dijagram na sl. 244. do 250. dan je opširan opis, tako da je posebno tumačenje na ovom mjestu nepotrebno.



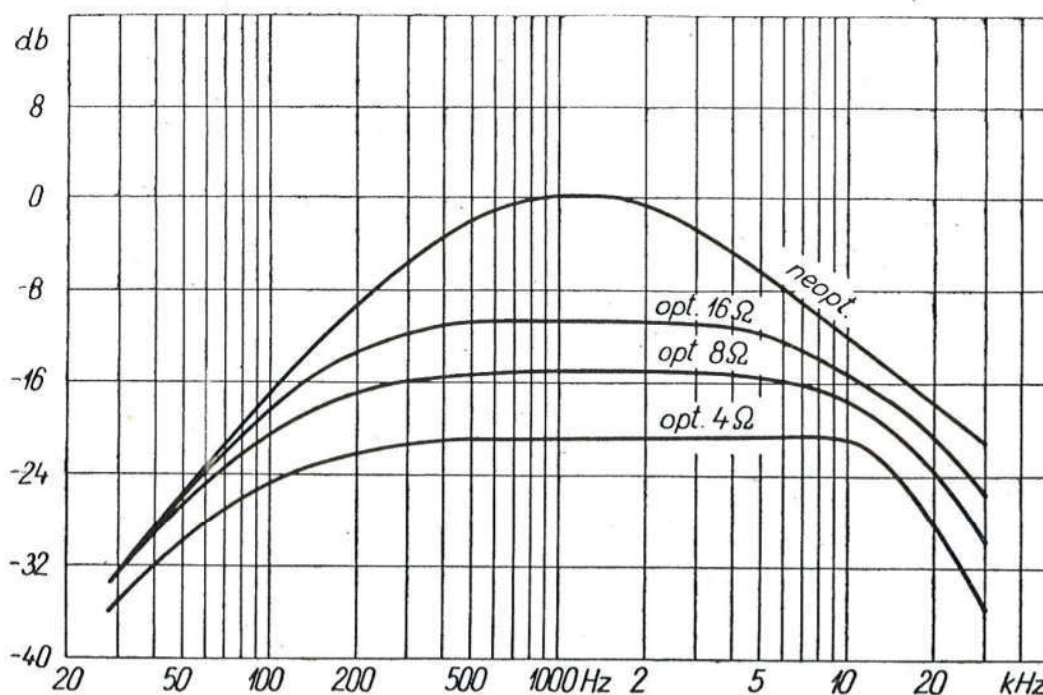
Sl. 242. Shema tro-vatnog pojačala (bez NR).



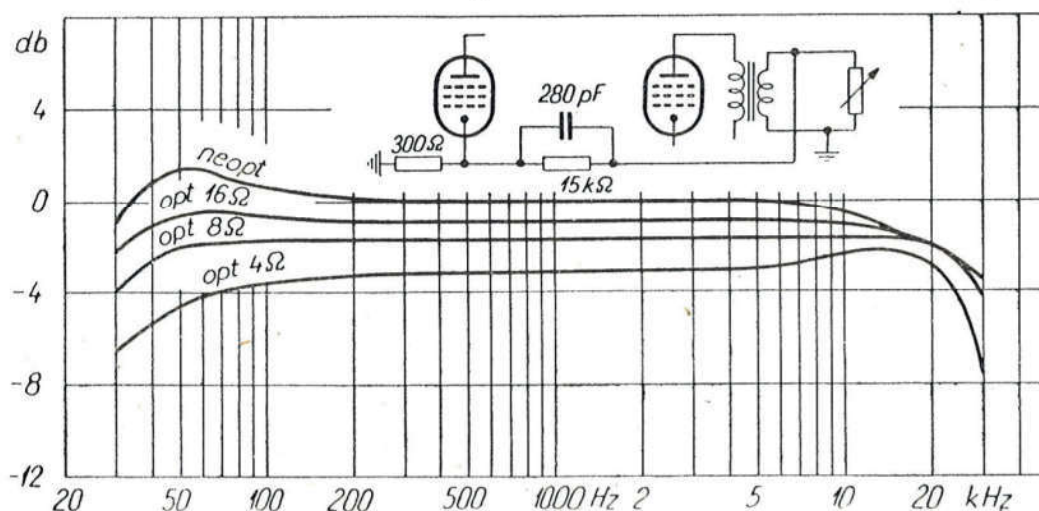
Sl. 243. Pogled na sagrađeno tro-vatno pojačalo.



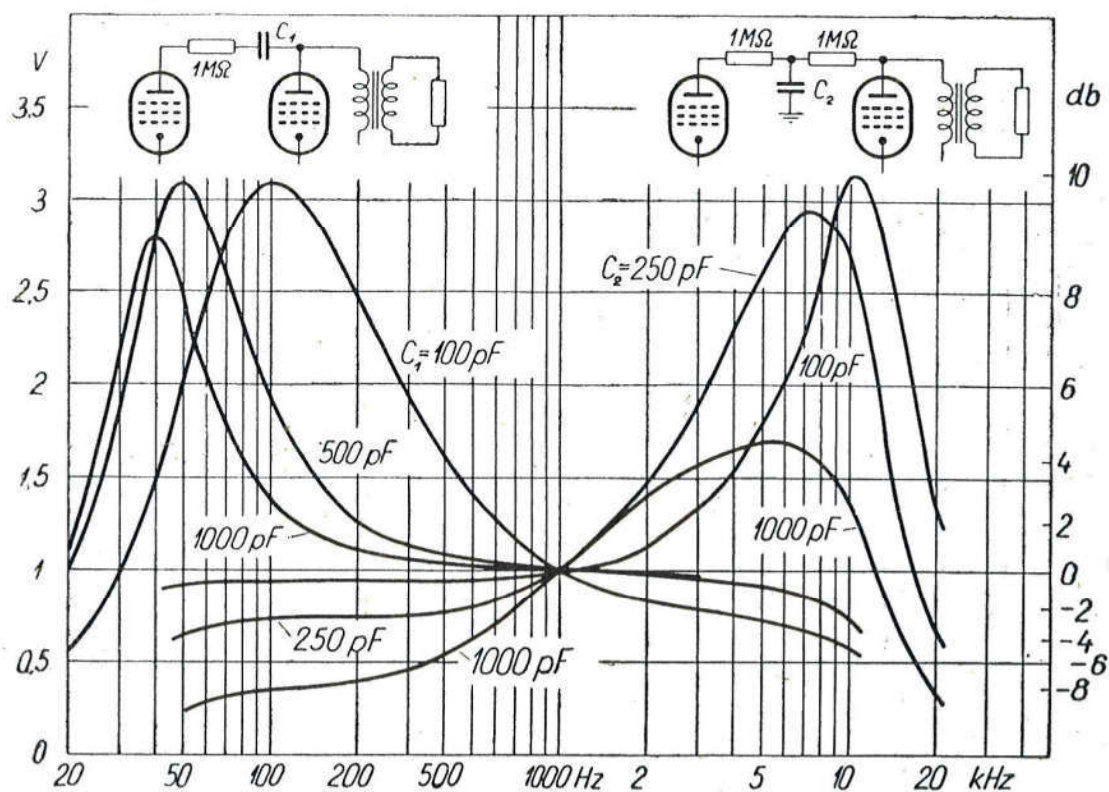
Sl. 244. Bez NR pojačalo prenosi pojas frekvencija od 170 Hz (gubitak napona od 3 db) do 13,5 kHz. Primjenom sekundarne NR od 14 decibela pojas se na niže proširi do nekih 25 Hz. Ako se paralelno gornjem otporu reakcione grane ne doda kondenzator, dolazi u području visokih frekvencija do slabljenja NR, odnosno do izdizanja prigušne karakteristike (krivulja 1). Pokusom nađeni kapacitet od 280 pF priguši izdizanje, čime se dobiva gornja granična frekvencija od nešto preko 30 kHz (krivulja 2). Druga dva sklopa sa NR daju lošije rezultate od prethodnog, i međusobno se po djelovanju razlikuju, iako se radi o istom stupnju NR (14 db). Spajanje otpora od anode do anode kao gornjeg otpora reakcione grane daje nešto bolju karakteristiku u području visokih frekvencija (krivulja 3). NR s otporom od anode izlazne elektronke na katodu prethodne daje nešto bolji rezultat u području niskih frekvencija (krivulja 4). Do toga dolazi odatle, što NR izvedena na prvi način u manjoj mjeri smanjuje izlazni otpor pojačala, nego ona s otporom od anode na katodu, što u vezi s transformatorom povoljnije utječe na prenošenje visokih frekvencija, a nepovoljnije na prenošenje niskih frekvencija. Do razlike između karakteristike 2 i karakteristike 3 i 4 dolazi zbog transformatora. Uključivanjem transformatora u petlju NR poboljšava se prigušna karakteristika kako u području niskih, tako i u području visokih frekvencija.



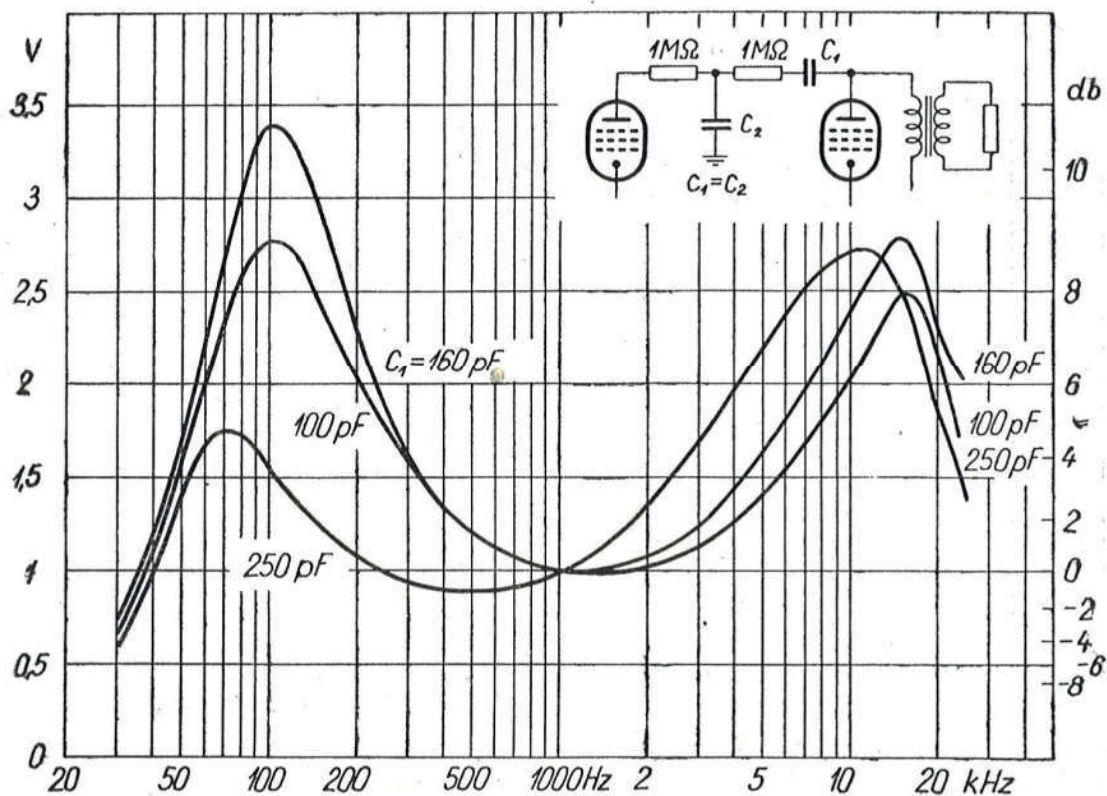
Sl. 246. Kod pojačala bez NR oblik prigušne karakteristike u velikoj mjeri ovisi o opterećenju. Ovo pojačalo, kad je neopterećeno, ima naročito nepovoljnu prigušnu karakteristiku. U području prema niskim frekvencijama karakteristika pada od 1000 Hz, i to zato, što u slučaju bez opterećenja primarni induktivitet nije šuntiran, i još k tome se kod sasvim niskih frekvencija unutarnji otpor zbog strujne NR na katodnoj impedanciji povećava. U području iznad 1000 Hz djeluje nešuntirani izlazni kapacitet (kapacitet anoda-katoda i vlastiti kapacitet primara). Zato se krivulja spušta sa 6 decibela po oktavi. Titrajni krug sastavljen od primarnog induktiviteta i izlaznog kapaciteta opterećivanjem se prigušuje. Kod visokih frekvencija dolazi do utjecaja rasipni induktivitet. Što je opteretni otpor manji, to je ovaj utjecaj veći, te strmina karakteristike u području najviših frekvencija sa smanjivanjem otpora raste.



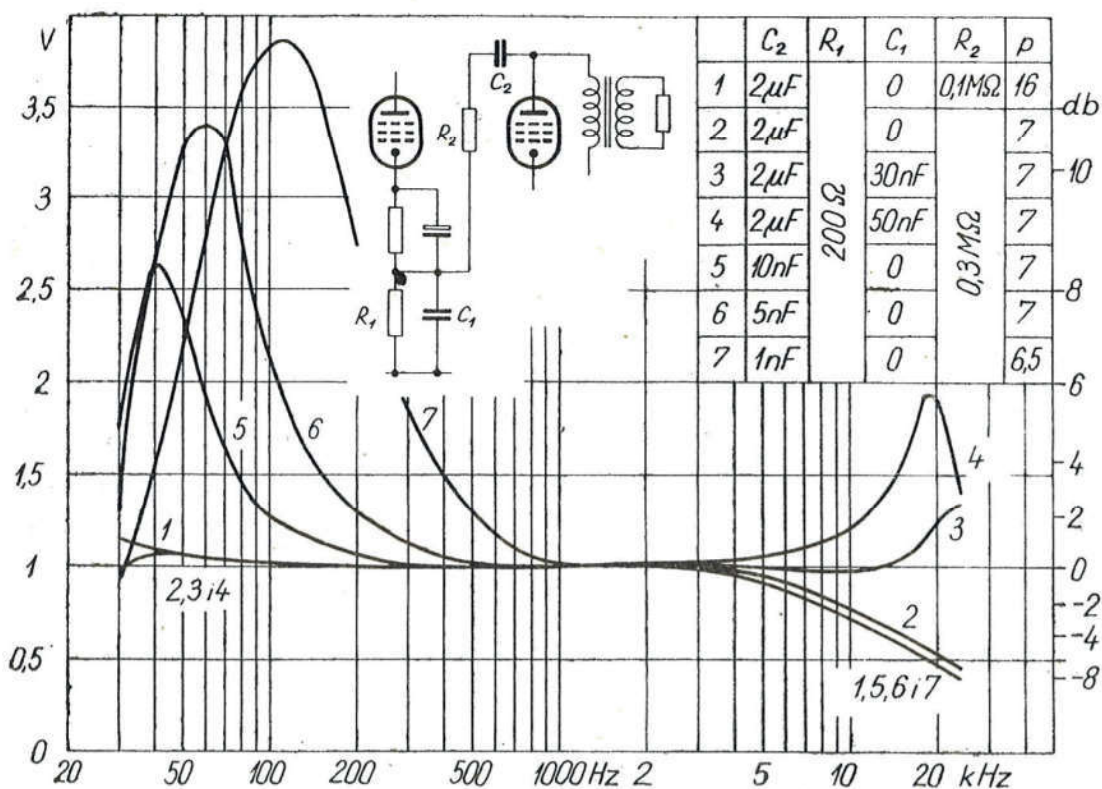
Sl. 247. NR u velikoj mjeri ublaži ovisnost prigušne karakteristike o opterećenju. Kad nema opterećenja, fazni zakret je u području niskih frekvencija velik, te dolazi do slabljenja NR i izdizanja prigušne karakteristike. Bez opterećenja, i uz opterećenje polovinom nominalnog opteretnog otpora (4 oma), izlazni napon se u području srednjih frekvencija razlikuje samo za nešto preko 3 decibela. Uz opterećenje od 4 oma pojavljuje se zbog rasipnog induktiviteta velik fazni zakret u području najviših frekvencija, te dolazi do slabljenja NR i izdizanja napona.



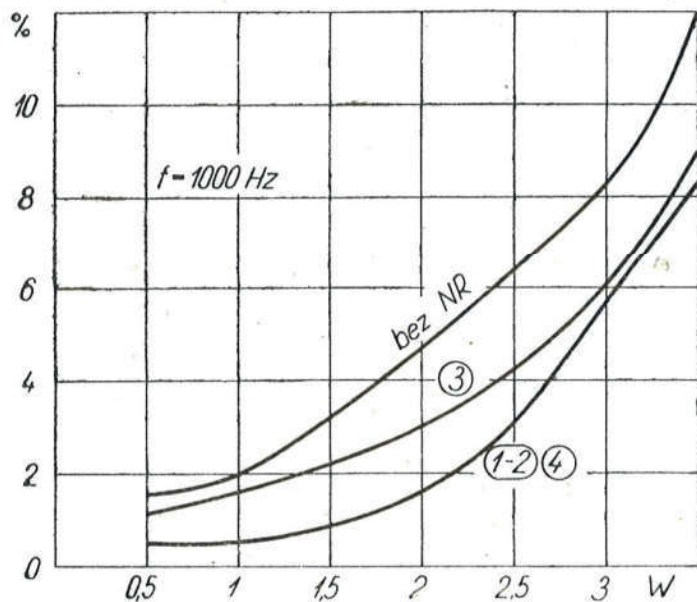
Sl. 248. Izdizanjem napona niskih frekvencija ovdje je dobiveno dodavanjem kapaciteta u seriju s reakcionim otporom, koji veže anodu s anodom. S povećavanjem kapaciteta karakteristike se pomiču ulijevo. Izdizanje napona visokih frekvencija ovdje je dobiveno kompleksnim djeliteljem napona spojenim između anode i anode. Smanjivanjem kapaciteta u ovom djelitelju pomiču se karakteristike udesno.



Sl. 249. Istodobno izdizanje napona niskih i visokih frekvencija postignuto je kombinacijom obaju sklopova iz sl. 248. Povećavanjem kapaciteta pomiče se karakteristika ulijevo.



Sl. 250. Izdizanje napona niskih i visokih frekvencija ovdje je postignuto pomoću NR s reakcionom granom od anode izlazne elektronke do katode prethodne elektronke. Podaci za pojedine slučajeve navedeni su u tabeli na slici. Stupanj NR označen sa p odnosi se na frekvenciju 1000 Hz.



Sl. 245. Ovaj dijagram prikazuje ovisnost faktora harmoničkog izobličenja o izlaznoj snazi. Brojevi uz krivulje odnose se na sklopove iz prethodne slike. U pogledu izobličenja nema razlike između sekundarne NR i primarne spajanjem anode s katodom. To znači, da kod te frekvencije (1000 Hz) transformator ne unosi izobličenje. Do razlike bi došlo kod niskih frekvencija, gdje izobličenje transformatora dolazi u red veličine izobličenja izlazne elektronke. Sklopovi 1—2 i 4 sa sl. 244. u većoj mjeri smanjuju izobličenje nego sklop 3. Razlog

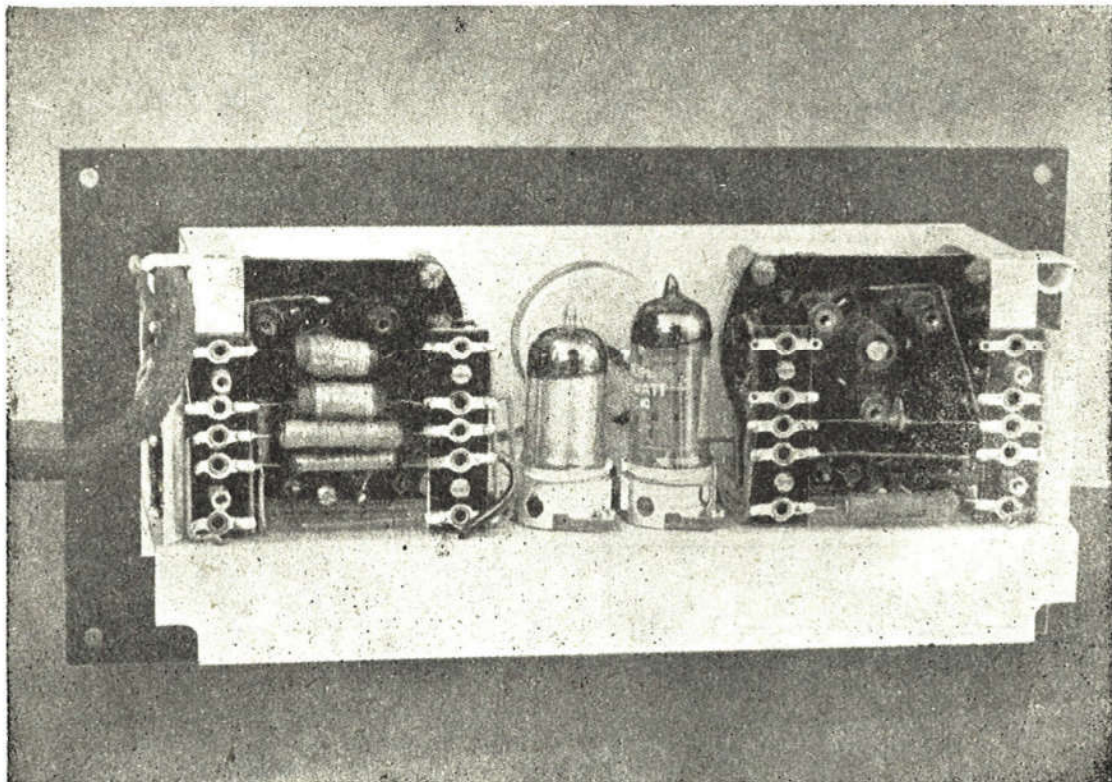
treba tražiti u tome, što NR u sklopu (3) ne utječe na izobličenje prve elektronke. Osim toga u sklopu (3) dolazi na rešetku veći napon, nego u ostala dva sklopa, jer uz isti ulazni napon dolazi u sklopovima (1—2) i (4) na rešetku razlika između ulaznog i reakcionog napona, te je izobličenje prve elektronke manje.

2. Korekciono pretpojačalo

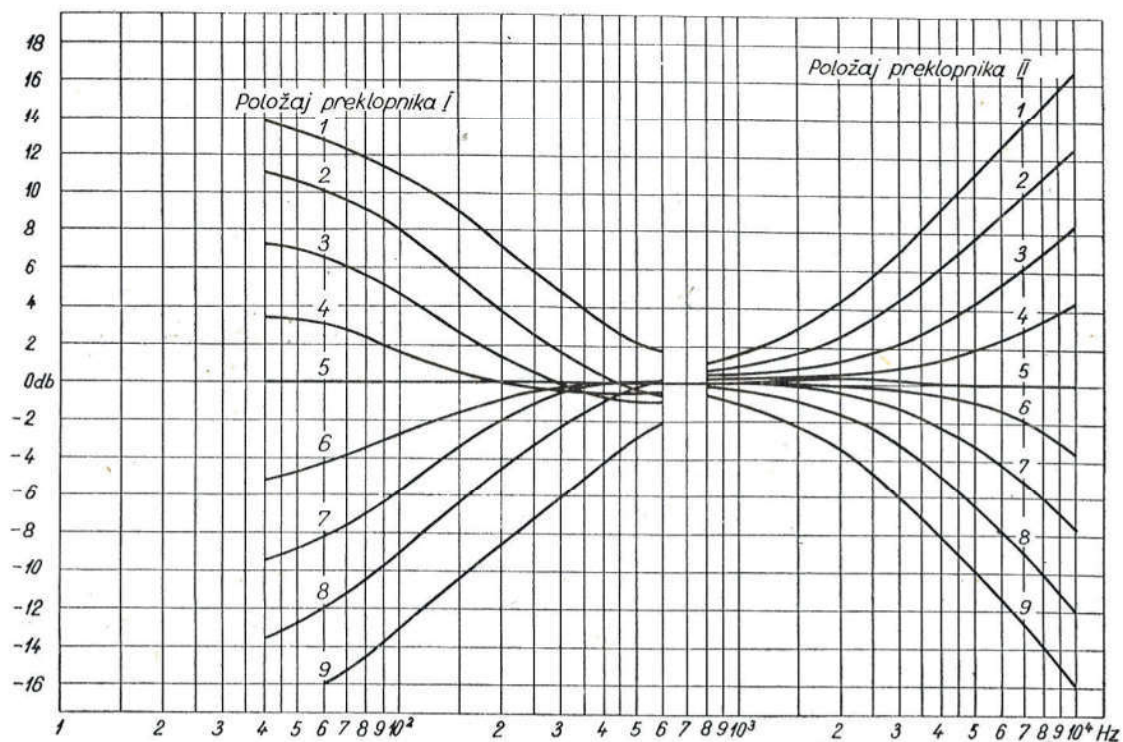
U ovom trostepenom pojačalu, shemu kojeg vidimo na sl. 251., upotrebljena je na ulazu dvostruka trioda ECC 40, a na izlazu se nalazi pentoda EF 40. Oba triodna sistema nalaze se u NR preko otpora od 330 kilooma, kojim je anoda druge triode spojena s katodom prve triode. Između anoda drugog i trećeg stupnja uvršten je kompleksni djelitelj napona, kojim se dobiva o frekvenciji ovisni reakcioni napon. Djelovanje ovakvog sklopa potanko je opisano u primjeru 24. Reguliranje izdizanja i spuštanja napona ekstremnih frekvencija vrši se u skokovima po 4 decibela. Pojačalo pojačava 90 puta (39 decibela — preklopnici u srednjem položaju). Kao izvor za napajanje iskorišten je mrežni dio deset-vatnog izlaznog pojačala, koje je opisano iza ovoga.

U području srednjih frekvencija izlazni stupanj ima pojačanje oko jedinice. Izlazna impedancija je vrlo niska, te se na izlaz može priključiti i kabel s relativno velikim kapacitetom, a da se prigušna karakteristika bitno ne promijeni. Vrijednost kapaciteta veznog kondenzatora na izlazu ovisi o opterećenom otporu. Uz opterećni otpor od 100 kilooma, koliko obično iznosi ulazni otpor pojačala snage za ovaj kapacitet može se uzeti vrijednost od $0,1 \mu\text{F}$.

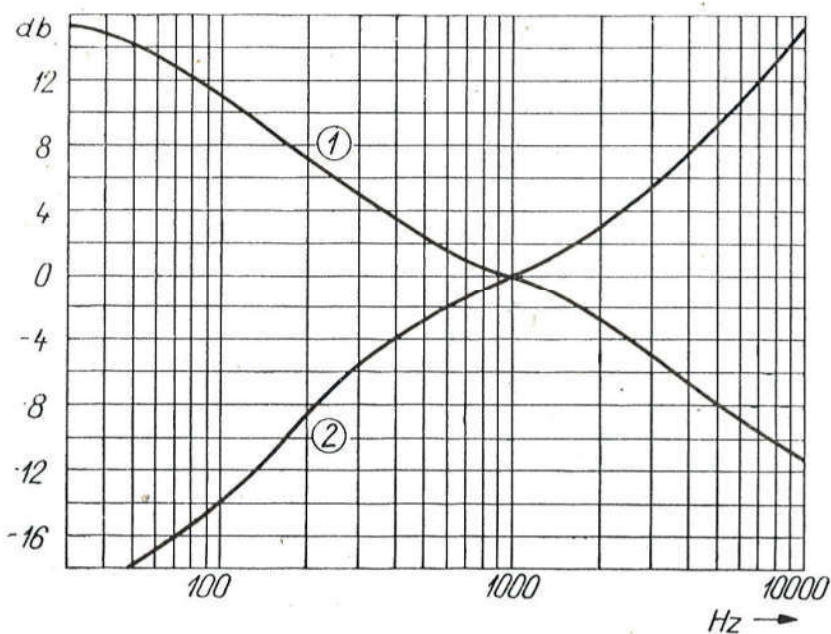
Umjesto preklopnika s otpornicima može se upotrebiti i potencijometar, kao što je učinjeno u shemi na sl. 215. Ako se kod donjeg potencijometra, odnosno preklopnika, sredina rastavi od »zemlje«, dobiva se manje izdizanje i spuštanje napona visokih frekvencija.



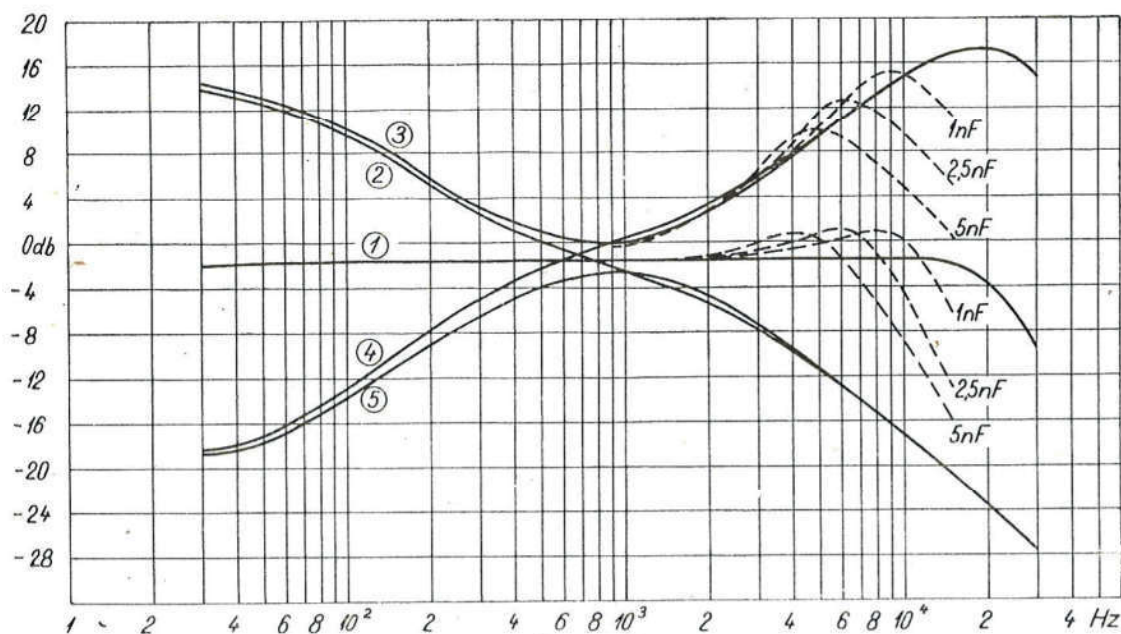
Sl. 252. Pogled na stražnji dio sagrađenog korekcionog pretpojačala.



Sl. 253. Naponske karakteristike korekcionog prepojačala uz razne položaje preklopnikâ. Karakteristike u području niskih frekvencija svedene su na isti nivo kod 3000 Hz, a karakteristike u području visokih frekvencija na istom su nivou kod 300 Hz.



Sl. 254. Naponske karakteristike, koje se dobivaju uz krajnje položaje obaju preklopnika. Karakteristika (1) spušta se s prosječnom strminom od tri i po decibela po oktavi, a karakteristika (2) se diže s prosječnim usponom od četiri decibela po oktavi.



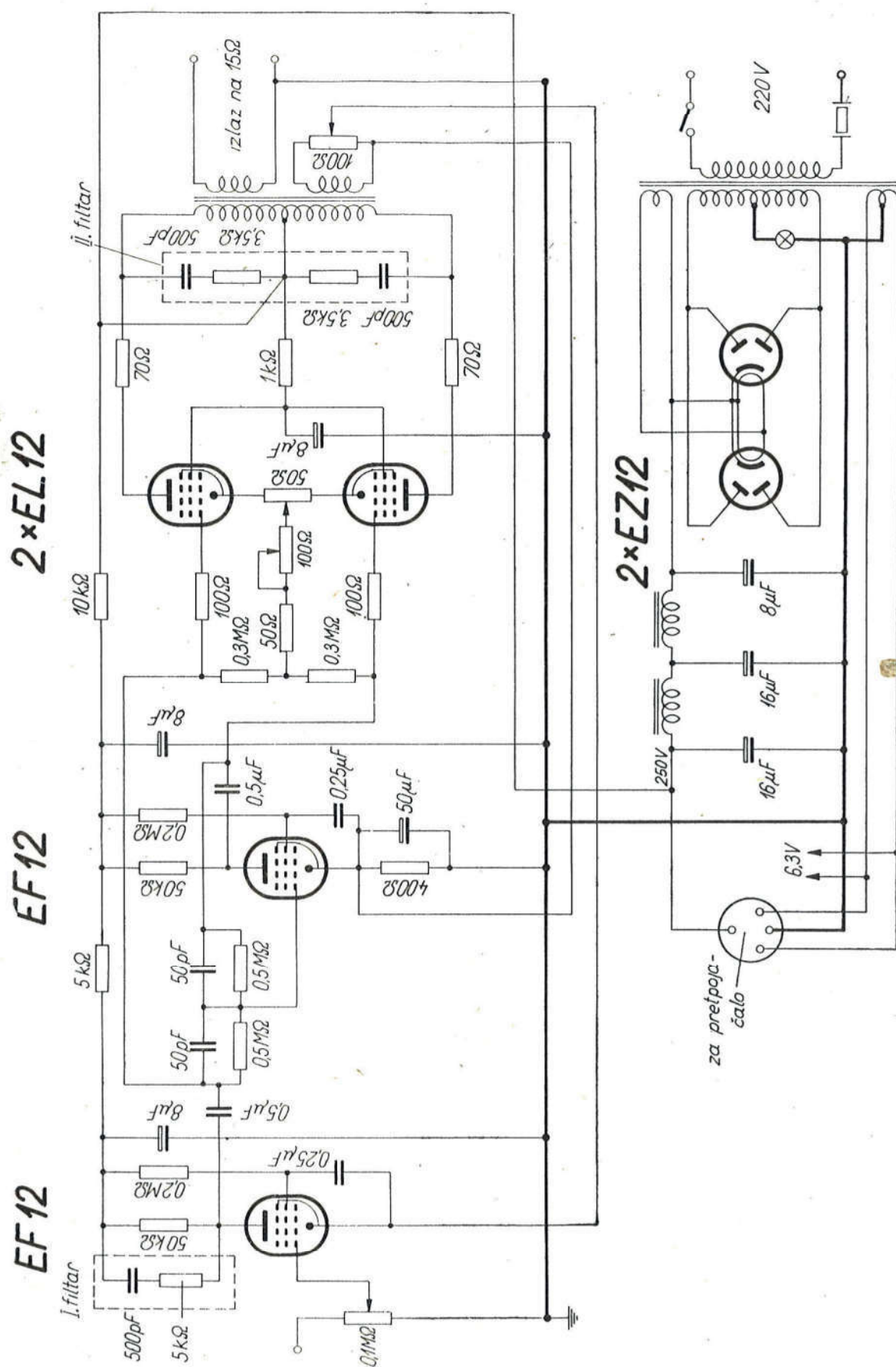
Sl. 255. Najvažnije karakteristike korekcionog pretpojačala. Karakteristika (1) dobiva se u položaju 5 obaju preklopnika. Karakteristike (2) i (4) su one iz sl. 254. Karakteristika (3) dobiva se u položajima 1, a karakteristika (5) u položajima 9 na oba preklopnika. Crtkane karakteristike se dobivaju opterećivanjem izlaza kapacitetima, koji nadomještavaju kapacitet kabla. Kapacitet od 1 nF praktički ne utječe na karakteristiku (3) do 10 kHz. Kapacitet od 2,5 nF uzrokuje kod 10 kHz gubitak napona od 6 decibela, a kapacitet od 5 nF gubitak od 8 decibela. Slične su prilike i kod karakteristike (1).

Na sl. 252. vidi se izgled stražnje strane ovog pretpojačala. Prigušne karakteristike prikazane su na sl. 253., 254. i 255.

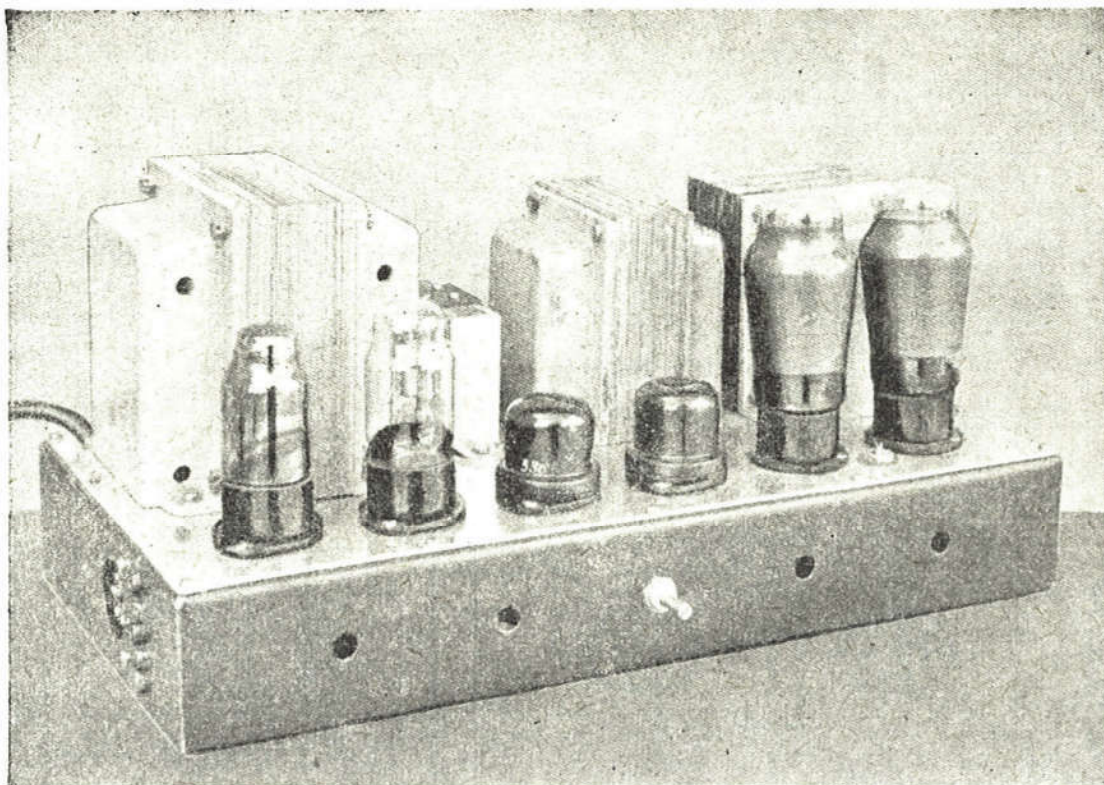
3. Visokokvalitetno deset-vatno pojačalo

Ovo pojačalo, shemu kojeg vidimo na st. 256., sagrađeno je prema opisu u časopisu *Wireless World*, januar 1948., u članku P. J. Baxandall-a »High-Quality Amplifier Design«. Upotrebene su elektronke EF 12 i EL 12. Primijenjen je obrtač faze, koji smo opisali u primjeru 20. Spojni kondenzatori su vrlo velikog kapaciteta ($0,5 \mu\text{F}$), tako da snizivanje napona nastaje prije zbog utjecaja izlaznog transformatora i impedancija zaštitnih rešetki, nego zbog ovih kapaciteta. Da bi se u što većoj mjeri smanjio parazitni kapacitet ovih kondenzatora, montirani su dalje od šasije, odnosno od dijelova, koju su direktno spojeni na šasiju.

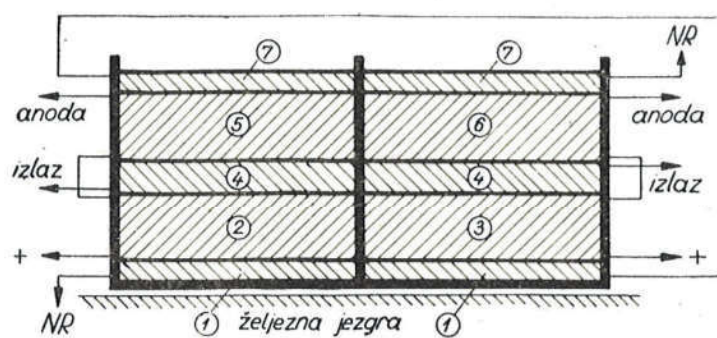
Izlazni transformator je tako građen, da omogućuje primjenu jake tercijarne NR. U području vrlo visokih frekvencija stabilnost je postignuta pomoću dva RC-elementa: jedan se nalazi u anodnom krugu prve elektronke (I. korektor), a drugi je (za svaku izlaznu cijev po jedan) spojen paralelno primaru izlaznog transformatora (II. korektor). Prvi snizuje napon vrlo visokih frekvencija za 20 decibela. Drugi RC- element ima osim stabiliziranja i taj zadatak, da spriječi prenapone, i da u slučaju induktivnog opterećenja održava konstantnom opteretnu impedanciju. Potencijometrom, kojim je opterećen



Sl. 256. Shema deset-vatnog pojačala.

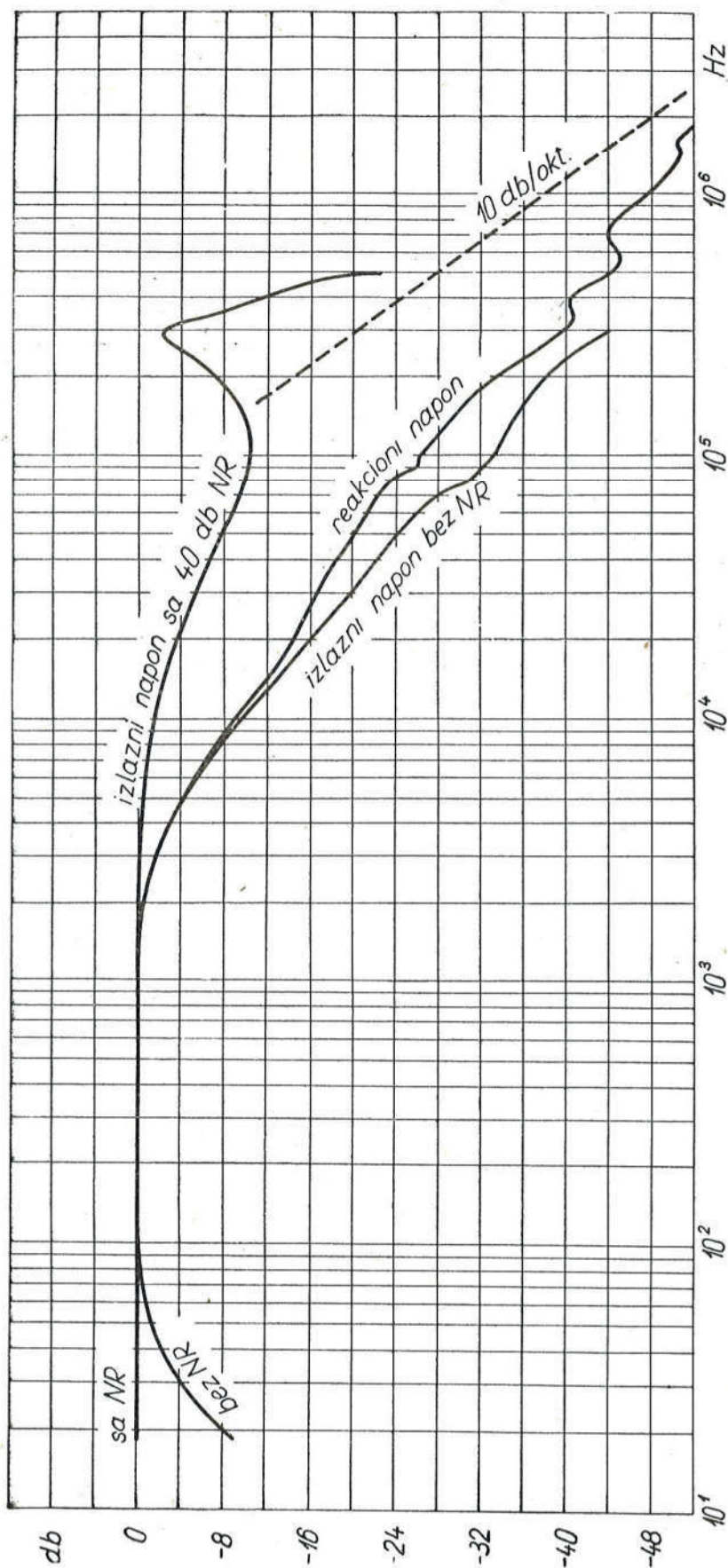


Sl. 257. Pogled na sagrađeno deset-vatno pojačalo.

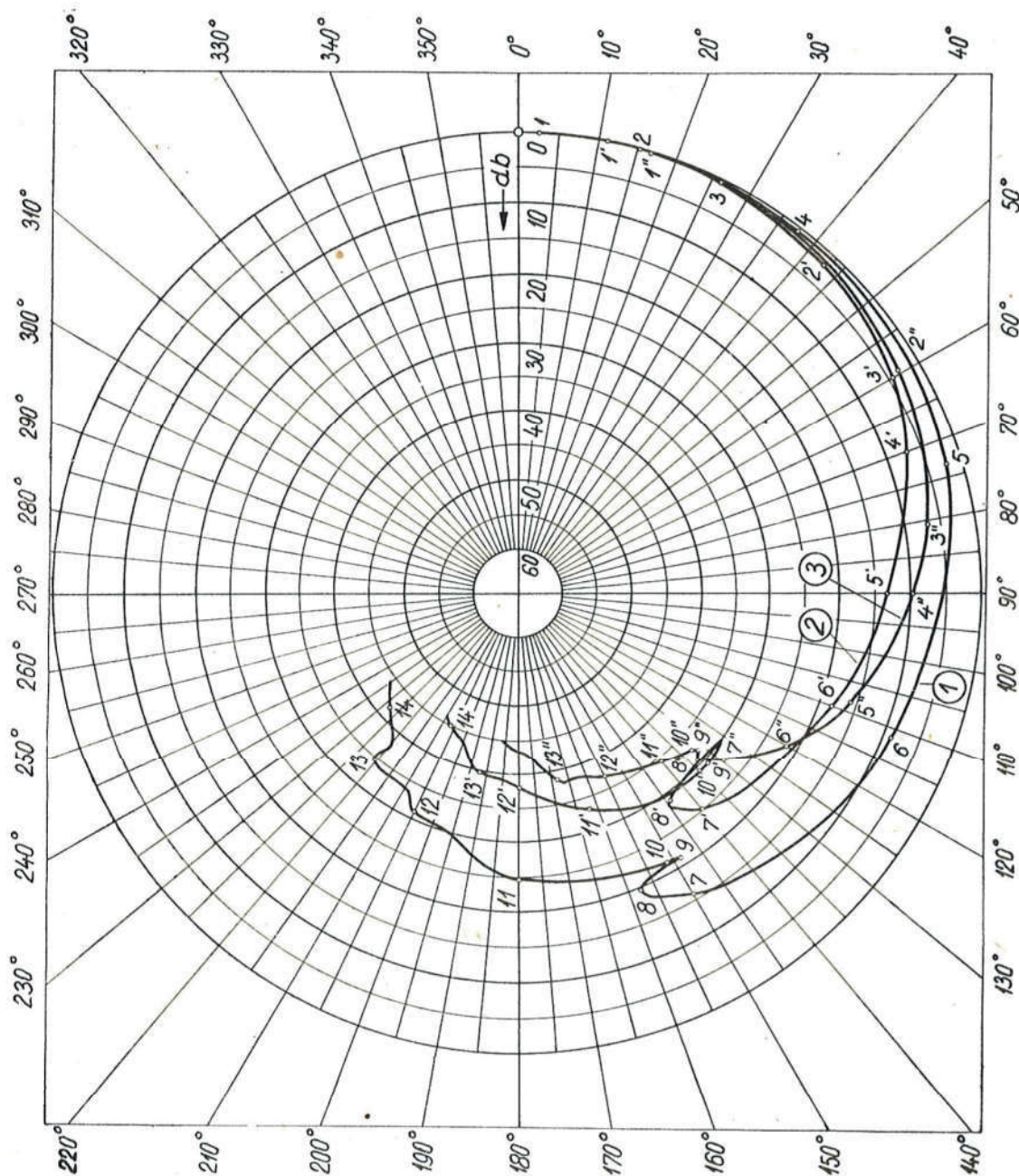


- ① - po 30 zavoja, 0,22 mm
- ② - 650 zavoja, 0,22 mm
- ③ - kao 2, motano u obrnutom smjeru
- ④ - po 50 zavoja, 0,8 mm
- ⑤ - kao ②
- ⑥ - kao ③
- ⑦ - kao ①

Sl. 259. Način namatanja i podaci o broju zavoja izlaznog transformatora.

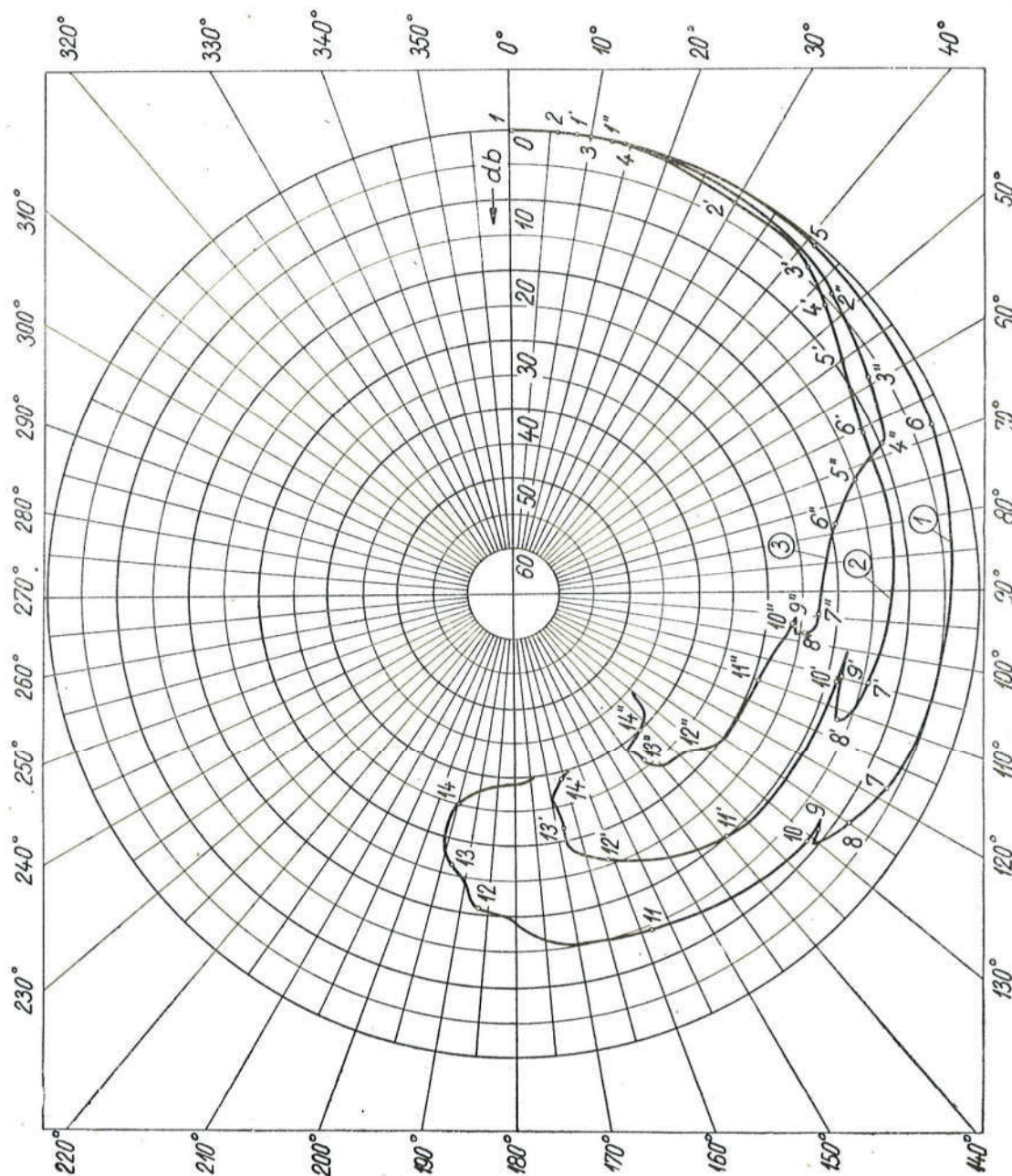


Sl. 258. Prigušne karakteristike deset-važnog pojačala. Prigušna karakteristika izlaznog napona bez NR vrlo je nepovoljna. Gubitak napona kod 30 Hz iznosi 4 decibela, a kod 16 kHz čak 14 decibela. Uz primjenu NR od 40 decibela gubitak napona u području niskih frekvencija praktički nema, dok se u području visokih frekvencija gubitak napona znatno smanji, tako da kod 16 kHz sada iznosi samo 3 decibela. Do većeg poboljšanja u području visokih frekvencija ne dolazi zbog toga, što tercijarni NR ne izravnavava gubitak napona na sekundaru. Reakcioni napon, to jest napon na tercijaru, ne pada tako brzo kao napon na sekundaru, i prosječni pad mu je manji od 10 decibela po oktavi.



točka	frekv.
1	1 kHz
2	4 kHz
3	7 kHz
4	10 kHz
5	20 kHz
6	40 kHz
7	70 kHz
8	80 kHz
9	90 kHz
10	100 kHz
11	130 kHz
12	180 kHz
13	220 kHz
14	300 kHz

Sl. 260. Polarni dijagrami izlaznog napona (napona na sekundaru, koji je opterećen radnim otporom od 15 oma — bez NR). Krivulja (1) odnosi se na pojačalo, kad nije uključeno ni prvi ni drugi korektor. Iz ove krivulje se vidi, da kod zakreta faze od 180° izlazni napon padne za 25 decibela, što bi uz amplitudno osiguravanje od 10 decibela omogućavalo primjenu NR od maksimalno 15 decibela. Uključivanjem prvog korektora dobiva se krivulja (2), iz koje se vidi, da se uz isto amplitudno osiguravanje može NR povećati na 28 decibela. Kad se doda i drugi korektor, može se primijeniti, kao što se vidi iz krivulje (3), NR od (43—10) = 33 decibela.



točka	frekv.
1	1 kHz
2	4 kHz
3	7 kHz
4	10 kHz
5	20 kHz
6	40 kHz
7	70 kHz
8	80 kHz
9	90 kHz
10	100 kHz
11	130 kHz
12	180 kHz
13	220 kHz
14	300 kHz

Sl. 261. Polarni dijagrami napona na tercijaru. Bez ijednog korektora, prilike su, kao što pokazuje krivulja (1), nepovoljnije nego kod napona na sekundaru, jer je uz amplitude osiguranje od 10 decibela moguća najveća NR od 8 decibela. Uvrštavanjem prvog korektora prilike se, kao što pokazuje krivulja (2), s obzirom na NR bitno mijenjaju. Što se tiče amplitude, moguća je primjena vrlo jake NR, ali je fazno osiguranje nedovoljno, jer iznosi samo 10°. Tek dodavanjem još i drugog korektora povećava se fazno osiguranje (krivulja (3)).

tercijar, može se stupanj NR mijenjati, čime se prema tome može mijenjati također pojačanje pojačala.

Podaci o izlaznom transformatoru nalaze se na sl. 258.

Pojačalo ostaje stabilno, ako se optereti bilo kakvim kapacitetima, paralelno opterećenom otporu ili bez njega.

Prigušne karakteristike pojačala prikazuje sl. 259.

Mjerenje polarnih dijagrama izvršeno je tako, da je otpor, što ga predstavlja tercijar u katodi prve elektronke, zamijenjen posebnim otporom na tome mjestu, a ulazni napon je doveden između katode prve elektronke i šasijske. Dijagrami na sl. 260. i 261. predstavljaju odnose napona i faze na sekundaru, odnosno na tercijaru.

Iznad frekvencije od 350 kHz krivulje nisu snimane, nego je samo izvršena kontrola amplitude napona do 1 MHz. Ovim ispitivanjem je utvrđeno, da napon s povisivanjem frekvencije neprestano pada.

Harmoničko izobličenje je kod izlazne snage od 10 vata i NR od 40 decibela manje od 0,3% čak i kod frekvencije od 40 Hz.

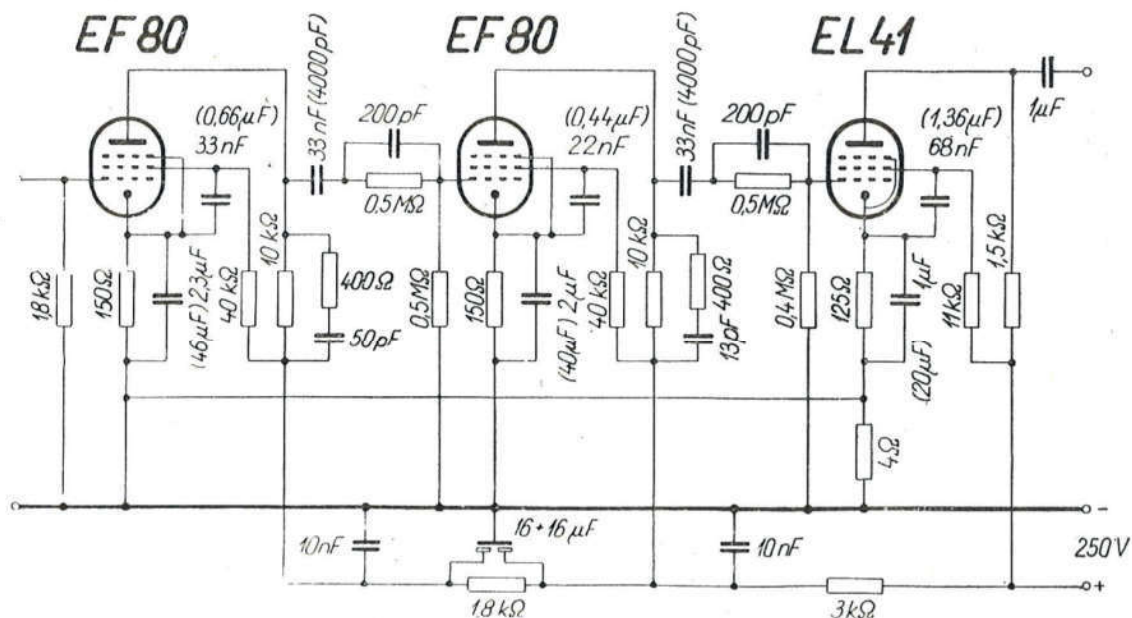
Puna izlazna snaga od 10 vata dobiva se uz ulazni napon od 11 volta.

Izlazna impedancija iznosi 1,2 oma.

Napon brujanja je 0,8 milivolta.

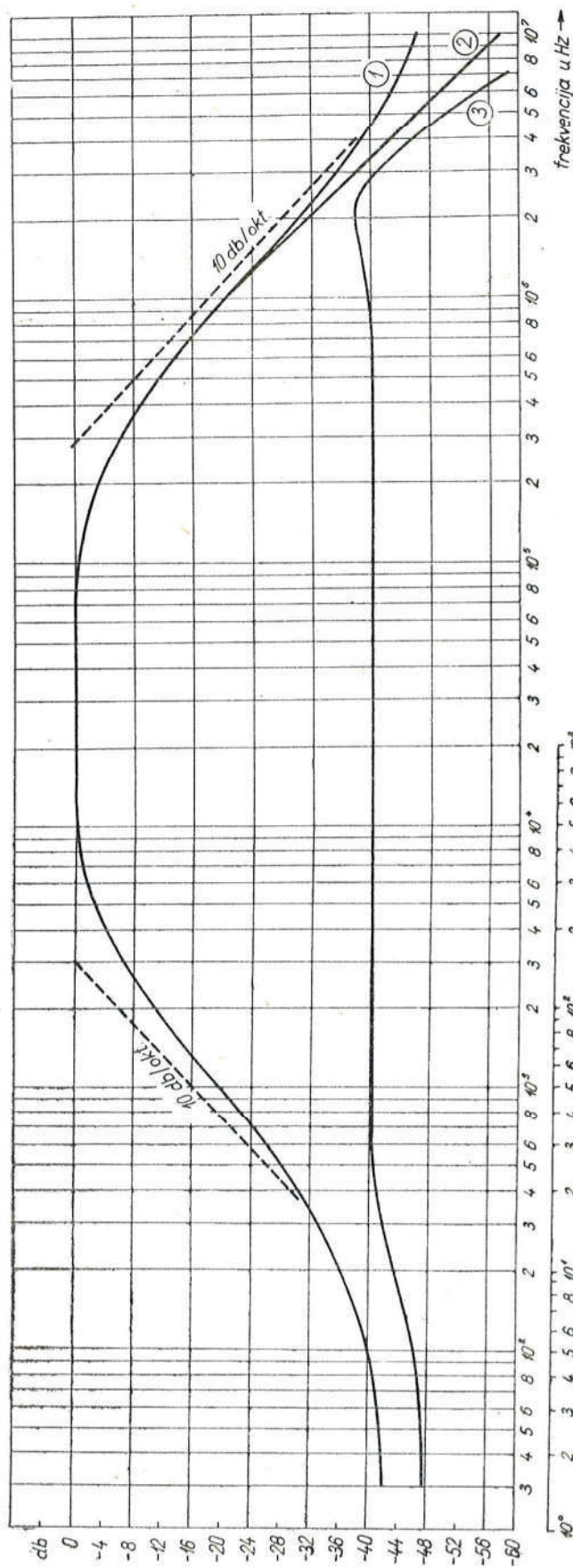
4. Širokopojasno pojačalo

Trostepeno pojačalo, shemu kojega vidimo na sl. 262. i pogled straga na sl. 263., predviđeno je za mjerne svrhe. Upotrebljene su cijevi EF 80 i EL 41. Za izvor anodnog napona upotrebljen je stabilizirani ispravljač s vrlo



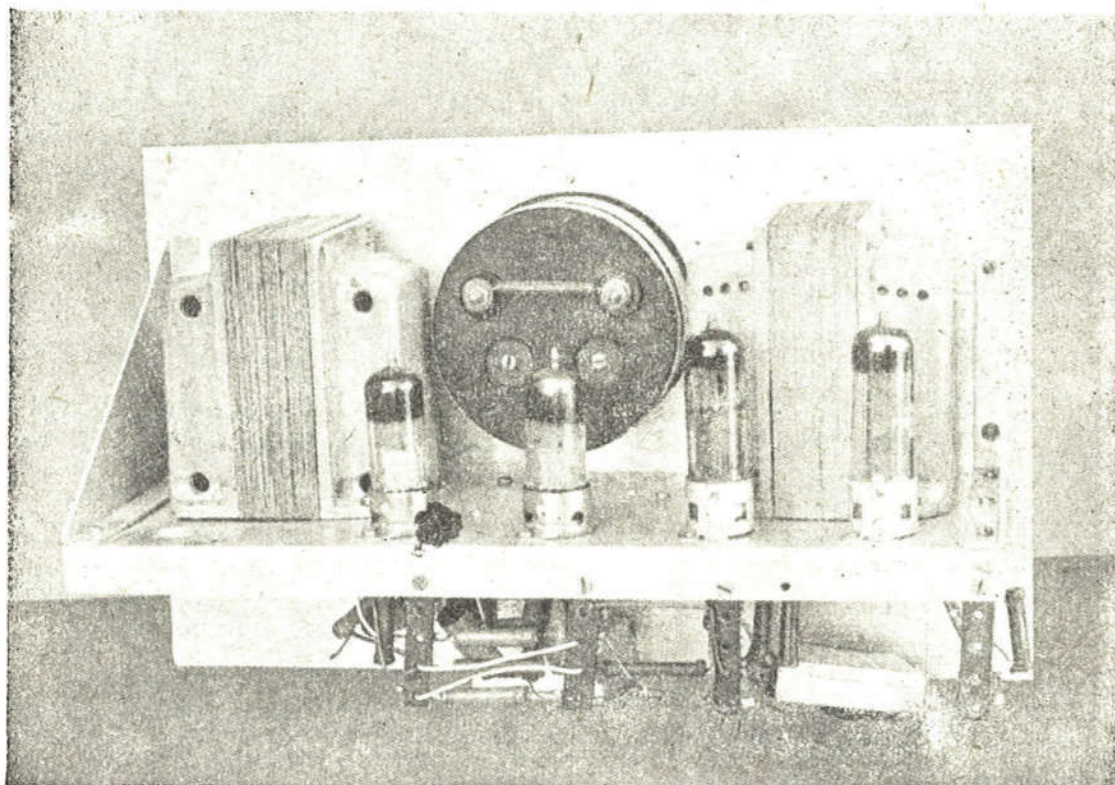
Sl. 262. Shema širokopojasnog pojačala.

malenim unutarnjim otporom (oko 2 oma). Da bi stabilnost u radu bila velika, primijenjena je kod pojačala vrlo jaka NR, i to NR od 40 decibela. Reakcioni napon dobiva se na otporu od 4 oma, koji se nalazi u katodi izlazne elek-



Sl. 264. Dijagrami napona kod širokopojasnog pojačala. Krivulja (1) prikazuje ovisnost reakcionog napona o frekvenciji. Ovaj napon ima prema najvišim frekvencijama sve manju strminu, čemu je uzrok induktivna komponenta reakcionog otpora. Prigušnu karakteristiku izlaznog napona bez primjene NR prikazuje krivulja (2). Ova se krivulja ne razlikuje od krivulje reakcionog napona, osim u području najviših frekvencija. Primjenom NR dobiva izlazni napon pojačala karakteristiku, koju prikazuje krivulja (3). Donja skala frekvencija na lijevoj strani vrijedi za slučaj, kad se kapaciteti, koji određuju tok prigušne karakteristike reakcionog, odnosno izlaznog napona u području najnižih frekvencija, povećavaju na dvadeset puta veću, to jest na normalnu vrijednost.

tronke. Stabilnost u području visokih frekvencija dobiva se korektorima u anodnom krugu prvog i drugog stupnja. U području niskih frekvencija stabilnost je postignuta ugađanjem kapaciteta u katodnim impedancijama, u impedancijama zaštitnih rešetaka, i dodavanjem kompleksnih djelitelja napona u rešetku drugog i trećeg stupnja. Da bi se mjerenje moglo izvršiti u tonfrekventnom području, bez upotrebe specijalnih generatora vrlo niskih frekvencija, kapaciteti su dvadeset puta manji, od onih, s kojima će pojačalo raditi u pogonu. Reakcioni napon mjereno je tako, da je veza katode prve elektronke s reakcionim otporom prekinuta i katoda spojena s minus-polom, a napon je mjereno na reakcionom otporu.



Sl. 263. Pogled straga na sagrađeno širokopojasno pojačalo.

Kao što se vidi iz sl. 264., pojačalo nema prigušnog izobličenja između 25 Hz i 600 kHz. Prema višim frekvencijama pojas se proteže i preko 3 MHz, ukoliko nema značenja izdizanje napona od nekih 3 decibela. No NR nije u cijelom pojasu jednako jaka. Stupanj NR od 40 decibela postignut je samo u području od 400 Hz do 100 kHz. Pojaćanje pojaćala sa NR iznosi 50 decibela.

Dodatak

1. Decibel

Za logaritamski odnos dviju snaga uvedena je u radiotehnici jedinica »bel«. U praktičkoj primjeni izražava se ovaj logaritamski odnos dviju snaga u desetim dijelovima bela ili decibelima (kratica: db):

$$\text{Broj decibela} = 10 \log \frac{N_2}{N_1}$$

Ako je snaga N_2 veća od snage N_1 , broj decibela je pozitivan, u obrnutom slučaju je negativan.

Izraze li se snage pomoću napona, dobiva se:

$$\text{Broj decibela} = 10 \log \frac{\frac{U_2^2}{R}}{\frac{U_1^2}{R}} = 20 \log \frac{U_2}{U_1}$$

Iz gornjih izraza slijedi, da se odnos između izlaznog i ulaznog napona kod nekog pojačala, ili njegovo pojačanje, može u decibelima izraziti samo u slučaju, ako se radi o *jednakim otporima* na ulazu i izlazu. Budući da je upotreba logaritamskog odnosa vrlo praktična, to se pojačanje pojačala izražava u decibelima i onda, kad otpori nisu jednaki. U tom slučaju se ne radi o pravim decibelima, koji se odnose na logaritamski odnos snaga, nego o »decibelima«, koji samo naznačuju, koliki je logaritamski odnos dvaju napona. Za ovakve decibele pokušava se uvesti kratica »dbv«, da se naznači, kako se oni odnose na *volte*, dakle na napone. Također se predlaže, da se za logaritamski odnos napona kod pojačala umjesto jedinice »decibel« uvede »*decilog*«.

Upotreba logaritamskog odnosa, odnosno jedinice decibel, praktična je iz više razloga. U prvom redu radeći s decibelima računa se s *mnogo manjim brojevima*. Na primjer, odnos 1,000.000/1 ili pojačanje od 1,000.000 puta znači pojačanje od 60 decibela. Daljnja prednost je u tome, što se *množenje i dijeljenje svodi na zbrajanje i odbijanje*. Na primjer: jedna elektronka u nekom dvostepenom pojačalu pojačava 100 puta ili 40 decibela, a druga 10 puta ili 20 decibela. Ukupno pojačanje je $100 \times 10 = 1000$, odnosno $40 + 20 = 60$ decibela.

Slijedeća tablica omogućuje, da se bez računanja lako nađe odnos napona (ili struja) za stanoviti broj decibela, odnosno, ako je poznat odnos, da se nađe, koliki broj decibela pripada tome odnosu.

I. Tablica decibela

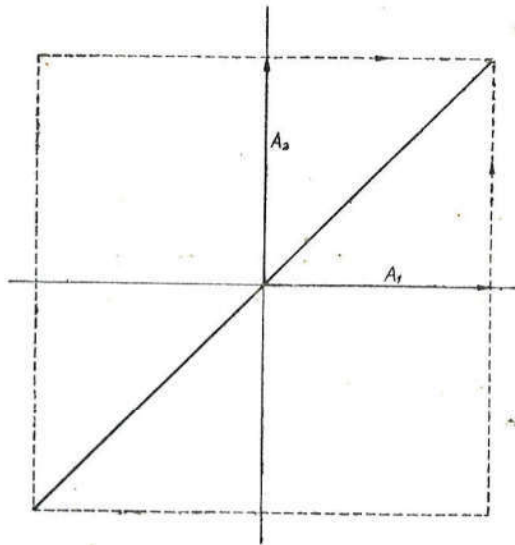
Deci- beli	Odnos napona ili struja		Deci- beli	Odnos napona ili struja	
	pojaćanje	prigušenje		pojaćanje	prigušenje
0,1	1,01	0,989	11	3,55	0,282
0,2	1,02	0,977	12	3,98	0,251
0,3	1,03	0,966	13	4,47	0,224
0,4	1,05	0,955	14	5,01	0,199
0,5	1,06	0,944	15	5,62	0,178
0,6	1,07	0,933	16	6,31	0,158
0,7	1,08	0,923	17	7,08	0,141
0,8	1,10	0,912	18	7,94	0,126
0,9	0,11	0,902	19	8,91	0,112
1,0	1,12	0,891	20	10,00	0,100
1,2	1,15	0,871	25	17,8	0,056
1,4	1,17	0,851	30	31,6	0,032
1,6	1,20	0,832	35	56,2	0,018
1,8	1,23	0,813	40	100,0	0,010
2,0	1,26	0,794	45	177,8	0,006
2,5	1,33	0,750	50	316	0,003
3,0	1,41	0,708	55	562	0,002
3,5	1,50	0,668	60	1000	0,001
4,0	1,58	0,631	65	1770	0,0006
4,5	1,68	0,596	70	3160	0,0003
5,0	1,78	0,562	75	5620	0,0002
5,5	1,88	0,531	80	10000	0,0001
6,0	1,99	0,501	85	17800	0,00006
6,5	2,11	0,473	90	31600	0,00003
7,0	2,24	0,447	95	56200	0,00002
7,5	2,37	0,422	100	100000	0,00001
8,0	2,51	0,398	110	316000	0,000003
8,5	2,66	0,376	120	1000000	0,000001
9,0	2,82	0,355	130	$3,16 \times 10^6$	$3,16 \times 10^{-7}$
9,5	2,98	0,335	140	10^7	10^{-7}
10	3,16	0,316	160	10^8	10^{-8}

2. Nalaženje faznog kuta iz odnosa dužina osi elipse na ekranu katodne cijevi

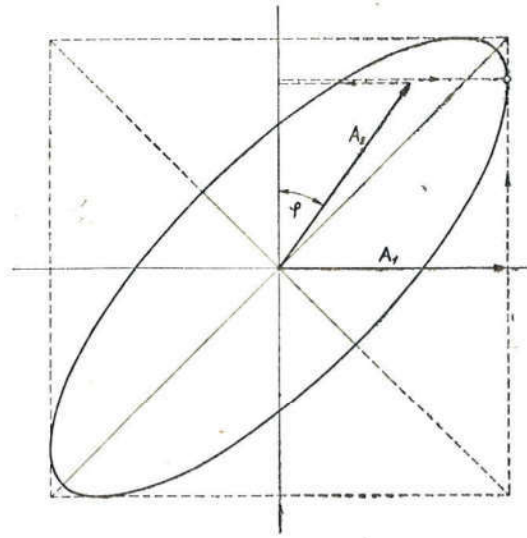
Parovi pločica, kojima se kod katodne cijevi privode izmjenični naponi, jedan na drugi su okomiti. Ako su privedeni naponi jednaki (uz jednaku osjetljivost parova pločica) i u istoj su fazi, onda ćemo vektore, koji te napone prikazuju, nacrtati tako da zatvaraju pravi kut (sl. 265.). Oba vektora treba da rotiraju u istom smjeru, samo će kod jednog od njih momentane vrijednosti prikazivati njegova projekcija na horizontalnu, a kod drugoga njegova projekcija na vertikalnu os. U ovom slučaju projekcije će davati točke, koje leže na dijagonalnom pravcu.

Kad naponi nisu u fazi, nisu vektori jedan na drugi okomiti. Jedan od vektora je za fazni kut φ pomaknut prema koordinatnoj osi (sl. 266.). U ovom slučaju projekcije vektora (svakog na svoju os), kad rotiraju, daju točke, koje leže na elipsi. Elipsa je upisana u kvadrat, kojemu na jednoj dijagonali

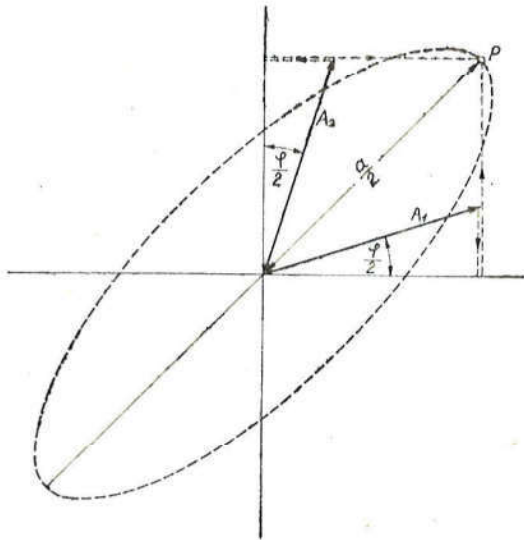
leži velika os ,a na drugoj dijagonali mala os elipse. Točka P na elipsi dobiva se onda, kad su projekcije obaju vektora jednake (sl. 267.). To je slučaj, kad je svaki od vektora pomaknut prema svojoj projekcionoj osi za polovinu



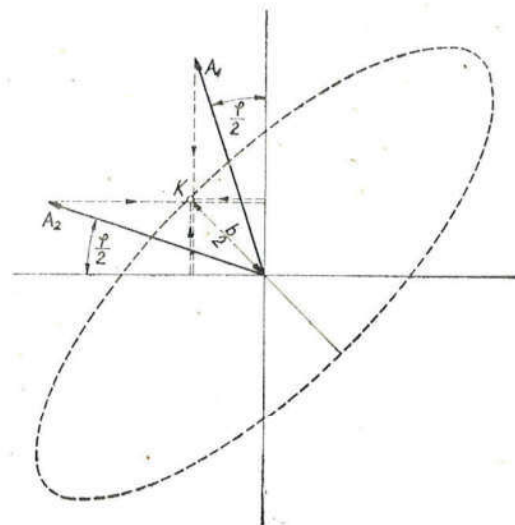
Sl. 265. Uz jednake i istofazne naponе privedene katodnoj cijevi dobiva se na ekranu kao slika pravac nagnut pod 45° .



Sl. 266. Jednaki naponi, ali fazno pomaknuti za kut φ daju na ekranu katodne cijevi elipsu, kojoj je velika os nagnuta prema horizontu za 45° .



Sl. 267. Iz ove slike se vidi, kako djeluju naponi na katodnoj cijevi, kad se svijetla točka nalazi na kraju velike osi elipse.



Sl. 268. Ova slika pokazuje, kakav je odnos među naponima, kad se svijetla točka katodne cijevi nalazi na kraju male osi elipse.

faznog kuta φ . Udaljenost točke P od ishodišta predstavlja polovinu velike osi elipse. Ako modul vektora označimo sa A, onda za polovinu velike osi elipse možemo pisati:

$$\frac{a}{2} = \sqrt{2} A \cos \frac{\varphi}{2}$$

Zakretom vektora za 90° dobiva se sl. 268. Projekcije vektora, opet svakog na njegovoj osi, daju točku K. Udaljenost ove točke od središta daje polovinu male osi elipse, za koju možemo pisati:

$$\frac{b}{2} = \sqrt{2} A \sin \frac{\varphi}{2}$$

Dijeljenjem ovog drugog izraza s prvim dobivamo novi izraz, iz kojeg se vidi, da se iz odnosa dužina osi može naći fazni kut:

$$\frac{b}{a} = \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$$

II. Tablica tangensa kutova

Kut ϑ	Tang ϑ	Kut ϑ	Tang ϑ	Kut ϑ	Tang ϑ	Kut ϑ	Tang ϑ	Kut ϑ	Tang ϑ
1°	0,017	11°	0,194	21°	0,384	31°	0,601	41°	0,869
2°	0,035	12°	0,213	22°	0,404	32°	0,625	42°	0,900
3°	0,052	13°	0,231	23°	0,424	33°	0,649	43°	0,933
4°	0,070	14°	0,249	24°	0,445	34°	0,675	44°	0,966
5°	0,088	15°	0,268	25°	0,466	35°	0,700	45°	1,000
6°	0,105	16°	0,287	26°	0,488	36°	0,727		
7°	0,123	17°	0,306	27°	0,510	37°	0,754		
8°	0,141	18°	0,325	28°	0,532	38°	0,781		
9°	0,158	19°	0,344	29°	0,554	39°	0,810		
10°	0,176	20°	0,364	30°	0,577	40°	0,839		

3. Izražavanje faktora harmoničnog izobličenja u decibelima

Faktor harmoničkog izobličenja je odnos efektivne vrijednosti svih harmonika prema efektivnoj vrijednosti ukupnog napona, odnosno struje. Kako se radi o *odnosu* napona ili struje, može se faktor harmoničkog izobličenja izraziti i u decibelima. Prednost ovog načina izražavanja faktora distorzije je u tome, što stupanj NR u decibelima predstavlja istodobno isto toliko smanjenje faktora distorzije u decibelima. Na primjer: faktor distorzije izlazne elektronke bez NR neka je 10% ili —20 decibela. Uz primjenu NR od 8 decibela izobličenje iznosi $-(20 + 8) = -28$ decibela (4%).

III. Tablica faktora distorzije

db	%	db	%	db	%	db	%
15	18	25	5,6	35	1,78	45	0,56
16	16	26	5	36	1,59	46	0,5
17	14	27	4,5	37	1,41	47	0,45
18	13	28	4	38	1,26	48	0,4
19	11	29	3,5	39	1,12	49	0,35
20	10	30	3,16	40	1	50	0,32
21	8,9	31	2,82	41	0,9	51	0,28
22	8	32	2,51	42	0,8	52	0,25
23	7,1	33	2,24	43	0,71	53	0,22
24	6,3	34	2	44	0,63	54	0,2

IV. Tablica kapacitivnih otpora

K A P A C I T I V N I O T P O R K A P A C I T E T A :		K A P A C I T I V N I O T P O R K A P A C I T E T A :										
Približna zaokružena frekvencija Hz	Frekvencija Hz	20 pF	50 pF	100 pF	200 pF	500 pF	1 nF	2 nF	5 nF	10 nF	20 nF	0,1 μF
30	31,8	250	100	50	25	10	5	2,5	1	0,5	0,25	50
40	39,8	200	80	40	20	8	4	2	0,8	0,4	0,2	40
50	47,7	166	67	33	16,6	6,7	3,3	1,66	0,67	0,33	0,166	33
60	62,7	125	50	25	12,5	5	2,5	1,25	0,5	0,25	0,125	25
80	79,6	100	40	20	10	4	2	1	0,4	0,2	0,1	20
100	95,6	83,3	33,3	16,7	8,33	3,33	1,67	0,833	0,333	0,167	83,3	16,7
150	143,3	55	22	11,1	5,5	2,2	1,1	0,55	0,22	0,111	55,5	11,1
300	318	25	10	5	2,5	1	0,5	0,25	0,1	50	25	5
400	398	20	8	4	2	0,8	0,4	0,2	80	40	20	4
500	477	16,6	6,7	3,3	1,66	0,67	0,33	0,165	67	33	16,6	3,3
600	627	12,5	5	2,5	1,25	0,5	0,25	0,125	50	25	12,5	2,5
800	796	10	4	2	1	0,4	0,2	0,1	40	20	10	2
1000	956	8,33	3,33	1,66	0,833	0,333	0,167	83,3	33,3	16,7	8,33	1,67
1200	1275	6,25	2,5	1,25	0,625	0,25	0,125	62,5	25	12,5	6,25	1,25
1500	1433	5,5	2,2	1,1	0,55	0,222	0,111	55,5	22,2	11,1	5,55	1,11
3000	3180	2,5	1	0,5	0,25	0,1	50	25	10	5	2,5	500
4000	3980	2	0,8	0,4	0,2	80	40	20	8	4	2	400
5000	4770	1,66	0,67	0,33	0,166	67	33	16,6	6,7	3,3	1,66	330
6000	6270	1,25	0,5	0,25	0,125	50	25	12,5	5	2,5	1,25	250
8000	7960	1	0,4	0,2	0,1	40	20	10	4	2	1	200
10000	9560	0,833	0,333	0,166	83,3	33,3	16,7	8,33	3,33	1,67	833	167
12000	12750	0,625	0,25	0,125	62,5	25	12,5	6,25	2,5	1,25	625	125
15000	14330	0,55	0,22	0,11	55,5	22,2	11,1	5,55	2,22	1,11	555	111
30000	31800	0,25	0,1	50	25	10	5	2,5	1	500	250	50
		MΩ					kΩ			Ω		

LITERATURA

Knjige

1. *H. Bartels: Grundlagen der Verstärkertechnik*
(S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1954)
2. *H. W. Bode: Network analysis and feedback amplifier design*
(D. van Nostrand Company, Inc., New York, 1955)
3. *L. Chretien: Ce qu'il faut savoir de la contre-réaction ou réaction négative*
(Etienne Chiron, Paris, 1946)
4. *J. Deketh: Bases de la technique des tubes de T. S. F.*
(Philips, Eindhoven, 1947)
5. *H. G. Mende: Kleines Praktikum der Gegenkopplung*
(Franzis-Verlag, München, 1952)
6. *J. Peters: Einschwingvorgänge, Gegenkopplung, Stabilität*
(Springer-Verlag, Berlin, 1954)
7. *F. L. Smith: Radio designer's handbook*
(Sydney, Australia, 1946)
8. *F. E. Terman: Radio engineering*
(McGraw-Hill Book Company, Inc., 1947)
9. *F. E. Terman: Radio engineer's handbook*
(McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1943)
10. * * * *Emetteur de radiodiffusion 135 kW O. M. Type T. H. 721*
(Compagnie française Thomson-Houston)

Članci u časopisima

1. *W. R. Ayres: Feedback from output transformer primary*
(Audio Engineering, May 1953)
2. *W. R. Ayres: Feedback from output transformer secondary*
(Audio Engineering, July 1953)
3. *W. R. Ayres: Feedback from output transformer tertiary*
(Audio Engineering, January 1954)
4. *W. R. Ayres: Stability testing of feedback amplifiers*
(Audio Engineering, September 1953)
5. *P. J. Baxandall: High-quality amplifier design*
(Wireless World, January 1948)
6. *P. J. Baxandall: Negative-feedback tone control*
(Wireless World, October 1952)
7. *F. Bergtold: Unterer Frequenzbereich bei Widerstandsstufen*
(Auslese der Funktechnik, Oktober 1942)
8. *Ch. Beurtheret: Justification de l'amélioration des normes de qualité des émetteurs de radiodiffusion*
(Revue technique Thomson-Houston, juillet 1952)
9. *H. Boucke: Aus Theorie und Praxis der Gegenkopplung*
(Funk, Februar 1940)

10. »Cathode Ray«: When negative feedback isn't negative
(Wireless World, May 1949)
11. W. T. Cocking: Push-pull input circuits
(Wireless World, Part I — January 1948, Part 2 — February 1948, Part —
5 — May 1948)
12. N. H. Crowhurst: New approach to negative feedback design
(Audio Engineering, May 1953)
13. J. Ellis: Bass compensation
(Wireless World, September 1947)
14. J. v. Frommer: Ueber die Verminderung der Verzerrungen durch negative
Rückkopplung
(Tungsram Mitteilungen »B« Reihe, August 1937)
15. V. C. Henriquez: Die Wiedergabe von hohen und tiefen Tönen bei Rundfunk-
empfängern
(Philips' technische Rundschau, April 1940)
16. E. J. James: Negative feedback calculations
(Wireless World, September 1948)
17. H. Klimpel: A critical feedback analysis
(Audio Engineering, October 1952)
18. W. A. Lynch: The stability problem in feedback amplifiers
(Proceedings of the I. R. E., September 1951)
19. R. M. Mitchell: Audio amplifier damping
(Electronics for communication engineers, McGraw-Hill Book Company,
Inc., 1952)
20. C. G. McProud: Amplifiers and preamplifiers
(Audio, January 1955)
21. Th. Roddam: More about positive feedback
(Wireless World, July 1950)
22. F. Schierl: Gegenkopplung der Verstärker
(Auslese der Funktechnik, April 1940)
23. E. Severin: Kennlinienfelder rückgekoppelter Röhren
(Auslese der Funktechnik, April 1940)
24. J. McG. Sowerby: Electronic circuitry
(Wireless World, September 1948)
25. J. McG. Sowerby: The see-saw circuit again
(Wireless World, December 1948)
26. M. Warnier: Les émetteurs de radiodiffusion utilisant la contre-réaction
(Revue technique Thomson-Houston, juillet 1952)
27. D. T. N. Williamson: High-quality amplifier, new version
(Wireless World, August 1949)
28. D. T. N. Williamson and P. J. Walker: Amplifiers and superlatives
(Wireless World, September 1952)
29. E. E. Zepler: Harmonic distortion and negative feedback
(Wireless Engineer, May 1954)
30. * * * Verringerung der Verzerrungen in der Endröhre durch niederfrequente
Rückkopplung
(Philips' Monatsheft für Apparate-Fabrikanten, August 1936)

S A D R Ž A J

	Strana
Predgovor	3
Uvod	5

GLAVA PRVA

SVOJSTVA ELEKTRONKE U NEGATIVNOJ REAKCIJI

1. Elektronka u reakciji	9
1. Pozitivna i negativna reakcija	9
2. Elektronka u negativnoj reakciji	9
3. Naponska i strujna negativna reakcija	10
2. Karakteristične veličine elektronke u negativnoj reakciji	11
1. μ , S i R _i kod elektronke u naponskoj negativnoj reakciji	11
2. μ , S i R _i kod elektronke u strujnoj negativnoj reakciji	13
3. μ , S i R _i kod elektronke u naponsko-strujnoj negativnoj reakciji	15
4. Nadomjesne sheme elektronke u negativnoj reakciji	15
3. Konstrukcija anodnih karakteristika elektronke u negativnoj reakciji	16
1. Anodne karakteristike elektronke u naponskoj negativnoj reakciji	16
2. Anodne karakteristike elektronke u strujnoj negativnoj reakciji	18

GLAVA DRUGA

OSNOVNA SVOJSTVA POJAČALA U NEGATIVNOJ REAKCIJI

1. Pojačalo u negativnoj reakciji	20
1. U petlju negativne reakcije može se uključiti više stupnjeva pojačala	20
2. Pojačalo kao cjelina u negativnoj reakciji	21
2. Negativna reakcija smanjuje pojačanje pojačala	21
1. Izlazni napon konstantan, ulazni napon promjenljiv	21
2. Napon na rešetki i ulazni napon	22
3. Pojačanje pojačala uz primjenu naponske negativne reakcije	22
4. Pojačanje pojačala uz primjenu strujne negativne reakcije	23
5. Pojačanje pojačala uz primjenu naponsko-strujne negativne reakcije	24
6. Faktor reakcije. Dijagram pojačanja uz primjenu negativne reakcije	24
7. Uz veliki faktor reakcije postaje pojačanje s negativnom reakcijom neovisno o pojačanju bez negativne reakcije	25
8. Stupanj negativne reakcije i decibeli	26
3. Negativna reakcija smanjuje prigušno izobličenje	26
1. Prigušna karakteristika ulaznog napona i negativna reakcija	26
2. Negativna reakcija djeluje u većoj mjeri na vršna pojačanja	29
3. Negativna reakcija proširuje pojas prenošenih frekvencija	30
4. U pojačalo unutar petlje negativne reakcije ne smiju se uključivati filtarski sklopovi	30

	Strana
4. Negativna reakcija smanjuje harmoničko izobličenje	31
1. Reakcioni napon izobličuje rešetkin napon	31
2. Anodni napon sinusoidan, rešetkin nesinusoidan	32
3. Smanjenje harmoničkog izobličenja posljedica lineariziranja radne karakteristike	33
4. Harmoničko izobličenje je toliko puta manje, koliko puta i pojačanje	34
5. Smanjivanje harmoničkog izobličenja posljedica niveliranja pojačanja	35
6. Kod većih harmoničkih izobličenja smanjenje izobličenja manje nego smanjenje pojačanja	36
7. Nastajanje novih harmonika	36
8. Oprez od izobličenja u pretpojačalu!	37
9. Pojačalo u negativnoj reakciji može uzrokovati neugodnija harmonička izobličenja nego bez negativne reakcije	37
10. Negativna reakcija primijenjena u jednom stupnju ne smanjuje izobličenje od struje rešetke	38
11. Zbog prigušnog izobličenja može doći do harmoničkog izobličenja	39
5. Negativna reakcija mijenja izlazni otpor pojačala	40
1. Izlazna elektronka u negativnoj reakciji i izlazni otpor	40
2. Izlazni otpor uz negativnu reakciju primijenjenu preko više stupnjeva	41
3. Drugačiji oblici formule za izlazni otpor	42
4. Smanjivanjem unutarnjeg otpora izlazne elektronke smanjuje se harmoničko izobličenje izlaznog transformatora	43
5. Naponska negativna reakcija smanjuje izlazni otpor svakog stupnja pojačala	44
6. Istodobna primjena naponske i strujne negativne reakcije i izlazni otpor	44
7. Naponska i strujna negativna reakcija i promjenljiv opterećni otpor	44
6. Ulazna impedancija pojačala u negativnoj reakciji	45
1. Impedancija nije uvijek čista impedancija	45
2. Negativna reakcija povećava ulazni otpor pojačala	45
3. Negativna reakcija smanjuje ulazni kapacitet pojačala	46
7. Negativna reakcija povećava konstantnost pojačanja kod pojačala	47
1. Promjene pojačanja se djelovanjem negativne reakcije smanjuju jednako kao i pojačanje	47
2. Primjer, u kojem je smanjenje promjene pojačanja manje nego smanjenje pojačanja	47
3. Velik reakcioni napon — malena osjetljivost na promjene pojačanja	48
4. U pojačalo unutar petlje negativne reakcije ne smije se stavljati regulator volumena	48
8. Negativna reakcija može smanjiti napone smetnji u pojačalu	49
1. Negativna reakcija ne može smanjiti napon šuma ulazne elektronke	49
2. Negativna reakcija može smanjiti napon brujanja, koji nastaje uslijed nedostatnog anodnog filtriranja, ali ga može i povećati	50
9. Negativna reakcija smanjuje fazno izobličenje	52
10. Mijenjanje prigušne karakteristike pojačala pomoću negativne reakcije	54
1. Izdizanje napona niskih frekvencija pomoću negativne reakcije	55
2. Izdizanje napona visokih frekvencija pomoću negativne reakcije	57
3. Prigušivanje napona niskih frekvencija pomoću negativne reakcije	58
4. Prigušivanje napona visokih frekvencija pomoću negativne reakcije	59
5. Induktivitet umjesto kapaciteta	60
6. Uz malen odnos otpora R_2/R_1 strmina karakteristike je manja	60
7. Izdizanje, odnosno prigušivanje napona jednog pojasa frekvencija	61
11. Izlazna snaga i negativna reakcija	62
1. Izlazna snaga i negativna reakcija uz opterećenje radnim otporom	62
2. Izlazna snaga i negativna reakcija uz opterećenje kompleksnim otporom	63
3. Negativna reakcija ne traži promjenu opteretne impedancije	65
4. Izlazna snaga se smanjuje primjenom negativne reakcije	66
12. Prednost uključivanja više stupnjeva pojačala u petlju negativne reakcije	67

GLAVA TREĆA

NEKI POSEBNI SLUČAJEVI NEGATIVNE REAKCIJE

	Strana
1. Strujna negativna reakcija kod jedne elektronke	69
1. Katodni otpor je dio opterećenog otpora	69
2. Napon na katodnom otporu veći od prednapona	69
3. Konstantna negativna reakcija uz kompleksan anodni otpor	70
4. Kroz reakcioni otpor ne smije prolaziti izmjenična struja zaštitne rešetke	70
2. Naponska negativna reakcija preko dva stupnja pojačala	72
1. Pojačanje uzimajući u obzir obje negativne reakcije	72
2. Pojačanje izraženo samo faktorom naponske negativne reakcije	72
3. Katodin	73
1. Pojačanje katodina uvijek je manje od 1	73
2. Izlazni otpor katodina je vrlo malen	74
3. Sklop, u kojem izlazni otpor katodina ovisi o unutarnjem otporu izvora ulaznog napona	75
4. Ulazna impedancija katodina je vrlo velika	77
5. Nadomjesna shema katodina	77
6. Izlazna snaga	78
7. Glavne karakteristike katodina	78
4. Katodinski obrtač faze	78
1. Jedan izlaz s naponskom, a drugi sa strujnom negativnom reakcijom	78
2. Izlazi nisu posve simetrični	79
3. Ulazna impedancija je pretežno kapacitivna	81
4. Glavne karakteristike	82
5. Paralelna negativna reakcija	82
1. Pojačanje kod paralelne negativne reakcije	82
2. Ulazna impedancija se smanji	84
3. Gornji otpor reakcione grane treba spojiti ispred veznog kondenzatora	84
4. Smanjenje ulaznog otpora može uzrokovati veliko harmoničko izobličenje	86
6. Nelinearna negativna reakcija	86
1. Nelinearni otpor u reakcionoj grani može dodatno smanjiti harmoničko izobličenje	86
2. Neželjena nelinearna negativna reakcija	87
7. Neželjena negativna reakcija zbog katodne impedancije	87
1. Katodna impedancija uzrokuje negativnu reakciju samo u jednom pojasu frekvencija	87
2. Osušeni elektrolitski kondenzator kvvari prigušnu karakteristiku pojačala	87
8. Neželjena negativna reakcija preko kapaciteta anoda-signalna rešetka	88
1. Ulazna impedancija se smanjuje	88
2. Također kod pentode može postojati značajan kapacitet između rešetke i anode	88
9. Kombiniranje negativne i pozitivne reakcije	89
1. Svojstva pozitivne reakcije	89
2. Povećanje negativne reakcije pomoću pozitivne reakcije	89
3. Pozitivna reakcija od katode na katodu	90
4. Ograničena pozitivna reakcija	91
5. Smanjivanje izlazne impedancije pojačala pomoću kombinacije negativne i pozitivne reakcije	91

GLAVA ČETVRTA

FAZNI ODNOSI U POJAČALU I NEGATIVNA REAKCIJA

	Strana
1. Oscilator	92
1. Reakcioni napon istofazan i iste veličine kao napon na rešetki	92
2. Reakcioni napon iste faze, ali veći od napona na rešetki	93
3. Uvjeti za nastajanje samooscilacija	93
4. Negativna reakcija se pretvara u pozitivnu reakciju	93
2. Zakretni faze u pojačalu	94
1. Međustepeni RC-elementi	94
2. Ulazni, odnosno međustepeni transformator	96
3. Impedancija u zaštitnoj rešetki	97
4. Katodna impedancija	98
5. Anodni filter	100
6. Izlazni transformator	101
3. Nehotično izdizanje napona krajnjih frekvencija kod primjene negativne reakcije preko više stupnjeva	103
1. Negativna reakcija kod jednog stupnja smanjuje prigušno izobličenje	103
2. Negativna reakcija preko dva stupnja pojačala može povećati prigušno izobličenje	105
3. Izlazni transformator djeluje kao jedan stupanj pojačala	107
4. Kod pojačala s više od dva stupnja može doći do oscilacija	107
5. Bočni vrhovi mogu biti uzrokom harmoničkog izobličenja i izobličenja transmodulacije	108
4. Idealna naponska karakteristika pojačala s obzirom na negativnu reakciju	108
1. Ovisnost oblika fazne karakteristike o obliku naponske karakteristike	108
2. Naponska karakteristika i stupanj negativne reakcije	110
3. Idealna frekventna karakteristika reakcionog napona	114
4. Fazno osiguranje	116
5. Usklađivanje idealne i stvarne naponske karakteristike pojačala s obzirom na negativnu reakciju	116
6. Maksimalna negativna reakcija	121
7. Fazna karakteristika u slučaju odstupanja naponske karakteristike od oblika idealne karakteristike	124
8. Amplitudno osiguranje od oscilacija	125
9. Naponska karakteristika korekcionih elemenata	125
10. Što je jača negativna reakcija, to u širem pojasu frekvencija treba utjecati na frekventnu karakteristiku reakcionog napona	126
5. Stabiliziranje pojačala u području visokih frekvencija	126
1. Stabiliziranje pomoću stupnjevanja gornjih graničnih frekvencija	126
2. Stabiliziranje pomoću kompleksnog djelitelja napona	126
3. Stabiliziranje na temelju idealne naponske karakteristike	131
4. Korekcionni filteri za približavanje idealnoj stepeničastoj naponskoj karakteristici	133
5. Proširivanje pojasa prenošenih frekvencija	136
6. Stabiliziranje pojačala u području niskih frekvencija	138
1. Stabiliziranje pomoću katodnih impedancija i impedancija zaštitnih rešetaka	138
2. Kompleksni djelitelj napona	140
3. Filtarska anodna impedancija	141
4. Sklop, koji nadomješta filtarsku anodnu impedanciju	142
5. Izlazni transformator ima promjenljivu graničnu frekvenciju	143
7. Izlazni transformator u petlji negativne reakcije	144
1. Primarna negativna reakcija	144
2. Sekundarna negativna reakcija	147
3. Tercijarna negativna reakcija	148

4. Izlazni otpor izlaznog stupnja treba smanjiti	149
5. Kod vrlo visokih frekvencija transformator se ponaša kao element s raspodijeljenim konstantama	150
8. Polarni dijagram pojačala	150
1. Jednostepeno pojačalo	150
2. Dvostepeno pojačalo	151
3. Trostepeno pojačalo	151
4. Opći oblik polarnog dijagrama	152
9. Stabilnost pojačala i polarni dijagram	152
1. Jednostepeno pojačalo	152
2. Dvostepeno pojačalo	153
3. Trostepeno pojačalo	153
4. Opći oblik polarnog dijagrama reakcionog napona	154
5. Uvjetna stabilnost	154
10. Optimalni oblik polarnog dijagrama	156
1. Polarni dijagram idealne naponske karakteristike	156
2. Polarni dijagram stepeničaste idealne karakteristike	156
3. Opći oblik polarnog dijagrama i uvjeti stabilnosti	156
4. Određivanje maksimalne negativne reakcije iz polarnog dijagrama izlaznog napona	157
11. Negativna reakcija u tehnici velikih odašiljača	159
1. Razina izobličenja i smetnji kod velikih odašiljača	159
2. Sekundarna petlja negativne reakcije	160
3. Pomoćno pojačalo	162
4. Smanjivanje brujanja izdizanjem pojačanja	163
5. Višestruka negativna reakcija kod velikog odašiljača	164
12. Ispitivanje pojačala u negativnoj reakciji na stabilnost od oscilacija	166
1. Jednostavan sklop i slaba negativna reakcija	166
2. Više stupnjeva pojačala u jakoj negativnoj reakciji	166
3. Pojačalo u AB-klasi	166
4. Praktičke metode za ispitivanje stabilnosti	167
13. Mjerenje polarnog dijagrama izlaznog i reakcionog napona	168
1. Mjerenje pojačanja	168
2. Mjerenje faze	168
3. Snimanje polarnog dijagrama izlaznog napona	170
4. Snimanje polarnog dijagrama reakcionog napona	172

GLAVA PETA

PRIMJENA NEGATIVNE REAKCIJE U PRAKTIČKIM SKLOPOVIMA	173
Primjer 1.	173
Primjer 2.	174
Primjer 3.	174
Primjer 4.	175
Primjer 5.	176
Primjer 6.	176
Primjer 7.	176
Primjer 8.	177
Primjer 9.	178
Primjer 10.	179
Primjer 11.	180
Primjer 12.	181
Primjer 13.	182
Primjer 14.	183
Primjer 15.	184

Primjer 16.	185
Primjer 17.	186
Primjer 18.	187
Primjer 19.	188
Primjer 20.	189
Primjer 21.	190
Primjer 22.	191
Primjer 23.	191
Primjer 24.	192
Primjer 25.	195
Primjer 26.	199
Primjer 27.	202
Primjer 28.	204
Primjer 29.	206
Primjer 30.	209

GLAVA ŠESTA

MJERENJA NA IZVEDENIM POJAČALIMA

1. Tro-vatno pojačalo	211
2. Korekciono pretpojačalo	217
3. Visokokvalitetno deset-vatno pojačalo	220
4. Širokopojasno pojačalo	226

DODATAK

1. Decibel	229
I. Tablica decibela	230
2. Nalaženje faznog kuta iz odnosa dužina osi ellipse na ekranu katodne cijevi	230
II. Tablica tangensa kutova	232
3. Izražavanje faktora harmoničkog izobličenja u decibelima	232
III. Tablica faktora distorzije	232
IV. Tablica kapacitivnih otpora	233
Literatura	234
Sadržaj	236

ING. TIHOMIL JELAKOVIĆ
NEGATIVNA REAKCIJA

IZDAVAČ
RADIOSTANICA ZAGREB

TISAK
TIPOGRAFIJA, GRAFIČKO-NAKLADNI ZAVOD, ZAGREB