



Univerza v Ljubljani



Fakulteta za elektrotehniko

# **Širokopasovni ojačevalnik**

## **Telekomunikacije – Komunikacijska vezja – 2002/2003**

**Primož Markelj**  
**primozmarkelj@yahoo.com**

**Mentor:**  
**dr. Anton Umek**

Logatec, 29/1/2003

# Kazalo

1.	<i>POVZETEK</i> .....	1
2.	<i>UVOD</i> .....	1
3.	<i>OPIS DELOVANJA VEZJA</i> .....	2
4.	<i>ANALIZA VEZJA</i> .....	3
4.1	Delovna točka.....	3
4.2	Frekvenčna analiza .....	4
4.2.1	Napajalni del .....	4
4.2.2	Vhodni filter .....	5
4.2.3	Ojačevalna stopnja 1 .....	5
4.2.4	Ojačevalna stopnja 2 .....	6
4.2.5	Analiza z programom Electronics Workbench .....	9
5.	<i>REZULTATI MERITEV</i> .....	11
5.1	Meritev z frekvenčnim generatorjem in oscilatorjem .....	11
5.2	Meritev z merilnikom TV/radio signalov .....	12
6.	<i>ZAKLJUČEK</i> .....	14
7.	<i>LITERATURA</i> .....	15

## Kazalo slik

<i>Slika 1: Električna shema ojačevalnika .....</i>	<i>1</i>
<i>Slika 2: Frekvenčni potek vhodnega filtra .....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 3: Potek faze filtra .....</i>	<i>5</i>
<i>Slika 4: Bodejev diagram ojačevalnika - ojačanje (elementi vezalne sheme).....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 5: Bodejev diagram ojačevalnika – fazni potek (elementi vezalne sheme) .....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 6: Bodejev diagram ojačevalnika - ojačanje (izračunana Cnp1 in Cnp2) .....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 7: Bodejev diagram ojačevalnika - ojačanje (optimalno) .....</i>	<i>11</i>
<i>Slika 8: Frekvenčni spekter vezja izmerjen z signalnim generatorjem in osciloskopom .....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 9: Spekter vhodnega TV signala.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 10: Izhodni spekter iz ojačevalnika .....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 11: Spekter vhodnega TV signala ob atenuatorju 10 dB.....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 12: Izhodni spekter iz ojačevalnika ob atenuatorju 10 dB .....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 13: Spekter vhodnega signala ob atenuatorju 16 dB.....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 14: Izhodni spekter iz ojačevalnika ob atenuatorju 16 dB .....</i>	<i>14</i>

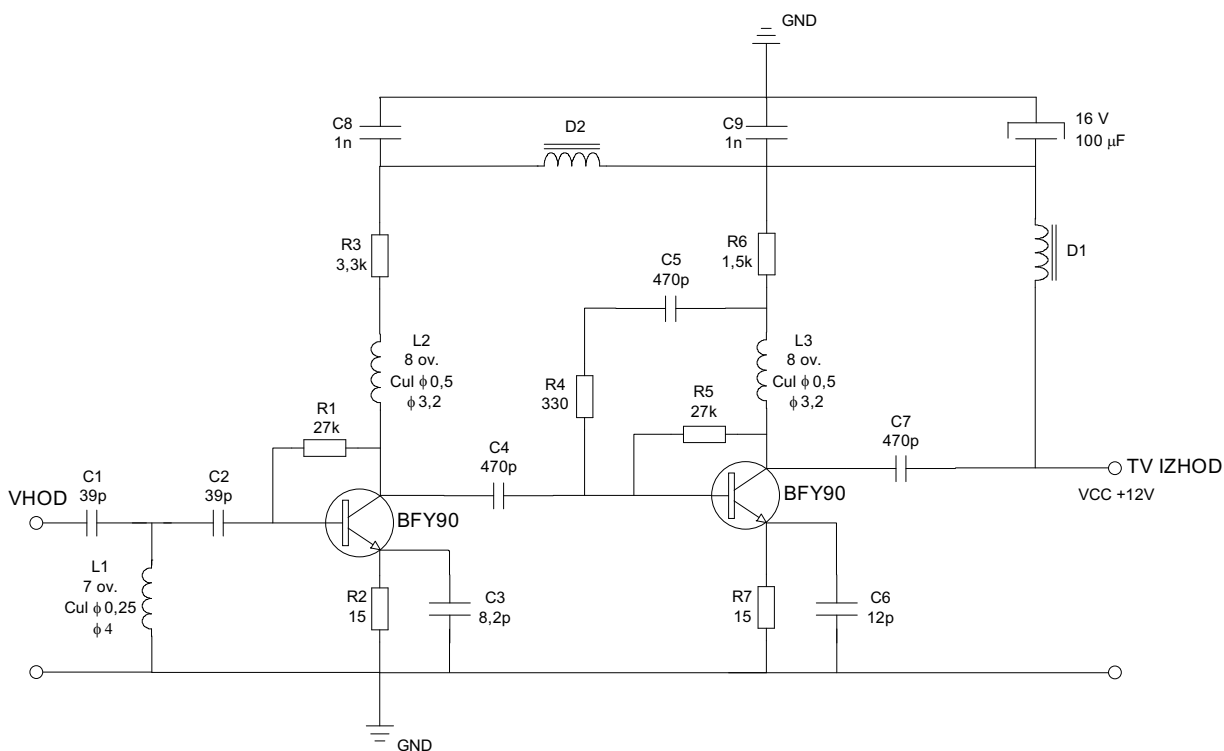
# 1. Povzetek

Seminarska naloga opisuje širokopasovni ojačevalnik, ki deluje v nazivnem področju od 47 do 606 MHz. Gre za preprosto vezje za uporabo pri sprejemu televizijskih programov oddajanih iz zemeljskih TV oddajnikov, ki ojača sprejeti signal za 16 +/-3 dB . Danes se za enake ali podobne aplikacije uporabljajo operacijski ojačevalniki, ki zagotavljajo boljše karakteristike, vendar predstavljajo  $\frac{3}{4}$  cene celotnega izdelka. Prednost ojačevalnika opisanega v tej nalogi pa je ravno to, da v primeru npr. udara strele ta ponavadi "skuri" tranzistor, ki pa ga ni težko zamenjati. Tako lahko take ojačevalnike hitro in poceni popravimo. Čeprav v novi izdelki z operacijskimi ojačevalniki delujejo nekaj bolje, pa se danes take in podobne ojačevalnike zaradi že navedenega razloga še vedno popravlja in uporablja. Ker pa so elementi vezani kar po "zraku", je potrebno upoštevati, da vezalne sheme ne zagotavljajo natančnega izračuna, ker se v vezju skriva še mnogo parazitnih elementov.

Naloga zajema opis delovanja, analizo in praktično izvedbo vezja.

# 2. Uvod

Z televizijskimi ojačevalniki sem se srečal že doma, ker se oče ukvarja tudi z izdelavo in popravilom le-teh. Dostikrat sem mu pomagal pri "postavljanju"



Slika 1: Električna shema ojačevalnika

televizijskih anten pri strankah in ga opazoval pri spajkanju vezij za ojačevalnike. Kasneje sem tudi sam omogočil sprejem zemeljskih TV programov nekaj svojim prijateljem, nikoli pa se nisem vprašal kaj pomeni kakšen kondenzator ali upor v vezju. Sedaj pa se mi je ponudila možnost za bolj resno in poglobljeno analizo ojačevalnika in za preizkus mojih spajkalnih sposobnosti.

### 3. Opis delovanja vezja

Kot je vidno iz električne sheme ojačevalnika (slika 1), je vezje sestavljeno iz dveh npn tranzistorjev. Podatki za tranzistorja BFY90 so sledeči:

- $\beta_{DC} = 150$  ( $I_C = 2 \text{ mA}$ )
- $\beta_{VF} = 50$
- $g_m = 45 \text{ mS}$  ( $I_C = 2 \text{ mA}$ )
- $C_{B'C} = 1,5 \text{ pF}$  ( $I_C = 2 \text{ mA}$ )
- $f_T = 1 \text{ GHz}$

Iz teh podatkov pa izračunamo še druge pomembne:

- $r_{BE} = \beta_{DC} / g_m = 3,3 \text{ k}\Omega$
- $f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{B'C} + C_{B'E})} \Rightarrow C_{B'E} = 5,7 \text{ pF}$
- $r_{B'B} = 50 \Omega$

Izračunati je potrebno tudi vrednosti obeh tuljav:

- $L = \mu\mu_0 n^2 \frac{S}{b} \Rightarrow L1=0,26 \mu\text{H}, L2=L3=92 \text{ nH}$

Vezje dvostopenjskega ojačevalnika je sestavljeno torej iz dveh n-p-n bipolarnih tranzistorjev tipa BFY90, uporov, kondenzatorjev, tuljav, dveh dušilk ter elektrolita kot prikazano na sliki 1. Ojačevalnik potrebuje za svoje delovanje še napajalnik 12 V. Običajno se uporablja transformatorje, ki dajejo toka od 90 do 200 mA ali več. Poraba samega vezja pa je okoli 30 mA. Možni sta dve izvedbi. Prva je, da se naredi napajalnik kar v isti škatli kot ojačevalnik. Ker pa se daje ojačevalnike ponavadi na podstreho, kjer so sprejemne antene, pa bi na podstrehi potrebovali še 220 V. Zaradi možnega pregrevanja transformatorja in samih 220 V pa zaradi požarne nevarnosti ta možnost ni priporočljiva. Druga bolj pogosto uporabljena možnost pa je, da damo napajalnik k televizorju in po koaksialnem kablu napajamo ojačevalno vezje. Majhen tok in 12 V pa ne predstavlja več požarne nevarnosti. Takemu napajanju pravimo tudi daljinsko napajanje.

Vhodna in izhodna upornost pa je po standardih za RF vezja  $75 \Omega$ .

## 4. Analiza vezja

### 4.1 Delovna točka

Najprej je potrebno izračunati delovno točko obeh tranzistorjev:

Tranzistor 1 (vhodni):

Za določitev delavne točke sta pomembna upora  $R_1$  in  $R_3$ .  $R_2$  je zelo majhen in ima zanemarljiv vpliv na določitev delavne točke. Uporabimo relacije:

$$I_{C1} = \beta \cdot I_{B1}, I_{E1} \cong I_{C1}, U_{CC} - I_{C1} \cdot R_3 - I_{B1} \cdot R_1 - U_{BE}, U_{BE} \cong 0,7 \Rightarrow \\ \Rightarrow I_{C1} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_2 + R_3 + \frac{R_1}{\beta_{DC}}} = 3,2mA, U_{CE1} = 1,2V$$

Tranzistor 2:

Na enak način določimo tudi delovno točko drugega tranzistorja:

$$I_{C2} = \beta \cdot I_{B2}, I_{E2} \cong I_{C2}, U_{CC} - I_{C2} \cdot R_6 - I_{B2} \cdot R_5 - U_{BE}, U_{BE} \cong 0,7 \Rightarrow \\ \Rightarrow I_{C2} = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_7 + R_5 + \frac{R_5}{\beta_{DC}}} = 6,6mA, U_{CE2} = 1,9V$$

Kot vidimo je kolektorski tok v obeh tranzistorjih precej visok. Pa tudi parametre tranzistorja imamo podane za  $I_C = 2mA$ , vendar je tudi ena od značilnosti visokofrekvenčnih vezij, saj velja, da začne pri frekvencah, ki se približujejo vrednosti:

$$f_{\max} \approx \frac{1}{R_L \cdot C_L}$$

potek ojačanja hitro upadati. Da nam torej začne potek ojačanja padati kar pri najvišji frekvenci torej znižujemo vrednost  $R_L$  (v našem vezju  $R_3$  in  $R_6$ ). S tem pa nam pada celotno ojačanje zaradi zmanjšanega  $g_m R_L$  faktorja. Zaradi tega pa zvišamo  $I_C$  in preko zveze  $g_m \approx 40 \cdot I_C$  zadržimo enako ojačanje.

Preden se lotimo frekvenčne analize moramo izračunati koliko prva stopnja obremenjuje drugo in obratno. V ta namen je potrebno izračunati vhodne impedance (upornosti) obeh stopenj pri enosmerni napetosti.

Vhodna impedanca 2.stopnje predstavlja vsoto  $r_{BE2}$  in  $\beta_{DC} R_7$  (preko tranzistorja transformirano  $R_7$ ) v vzporedni vezavi z na vhod transformirano upornostjo  $R_1$  (izračuni so preneseni iz programa Matcad, Par pomeni paralelno vezavo):

$$Au2 := 1 - gm2 \cdot (\text{Par}(R6, R_{zh}))$$

$$Zvh2 := \text{Par} \left[ \beta_{nf} \cdot (re2 + R7), \frac{R5}{1 - Au2} \right]$$

$$Z_{vh2} = 1.424 \cdot 10^3 \quad \blacksquare$$

Vhodno impedanco 1. stopnje izračunamo na enak način, le da upoštevamo pri ojačanju 1. stopnje tudi vhodno upornost 2. stopnje:

$$A_{u1} := 1 - g_{m1} \cdot (\text{Par}(R3, Z_{vh2}))$$

$$Z_{vh1} := \text{Par} \left[ \beta_{nf} \cdot (r_{e1} + R2), \frac{R1}{1 - A_{u1}} \right]$$

$$Z_{vh1} = 344.888 \quad \blacksquare$$

Vhodna impedanca se nato transformira še čez filter in ima vhodno upornost okoli  $75 \Omega$ .

## 4.2 Frekvenčna analiza

Vežja najprej razdelimo na 4 dele, ki jih bomo zaradi lažje analize obravnavali vsakega posebej. Osnovni deli torej so:

- napajalni del vežja
- vhodni filter sestavljen iz kondenzatorjev C1 in C2 ter tuljave L1
- ojačevalna stopnja 1
- ojačevalna stopnja 2

### 4.2.1 Napajalni del

Osnovne zahteve napajanje, vsaj kar se tiče same zunanje izvedne, so opisane že v opisu vežja. Ponovil bom nekaj osnovnih značilnosti. Ojačevalnik potrebuje za svoje delovanje napajalnik 12 V, poraba samega vežja pa je okoli 30 mA. Možni sta dve izvedbi. Prva je, da se naredi napajalnik kar v isti škatli kot ojačevalnik. Druga bolj pogosto uporabljena možnost pa je, da damo napajalnik k TV sprejemniku in po koaksialnem kablu napajamo ojačevalno vežje. Toliko o tem kako pridobimo 12 V, ki jih potrebujemo za delovanje vežja.

12 V, ki smo jih dobili na enega od zgoraj opisanih načinov je potrebno priključiti na izhod od koder je omogočeno napajanje vežja. Ker kondenzator C7 blokira enosmerno napetost potuje ta na dušilko D2. K napajalnemu vežju pa spada še ena dušilka D1, dva kondenzatorja C8 in C9 in elektrolit.

Dušilki prepuščata le enosmerno napetost, ki jo potrebujemo za napajanje ojačevalnikov.

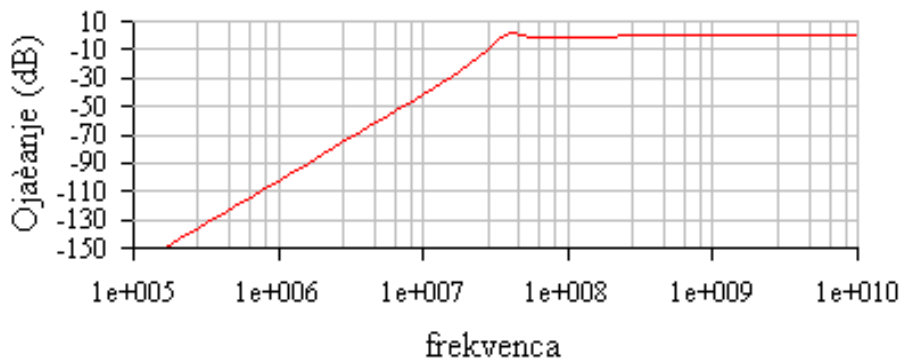
Kondenzatorja sta zelo majhnih vrednosti. Pomembna sta za visoke frekvence, saj gladita najrazličnejše visokofrekvenčne "špice", ki se pojavijo v vežju in jih odvedeta na maso.

Podobno nalogo kot kondenzatorja ima tudi elektrolit, ki pa gladi predvsem frekvenčne komponente nizkih napetosti, ki bi prišle preko dušilke. Skupaj te elementi torej zagotavljajo kar najbolj čisto enosmerno napetost.

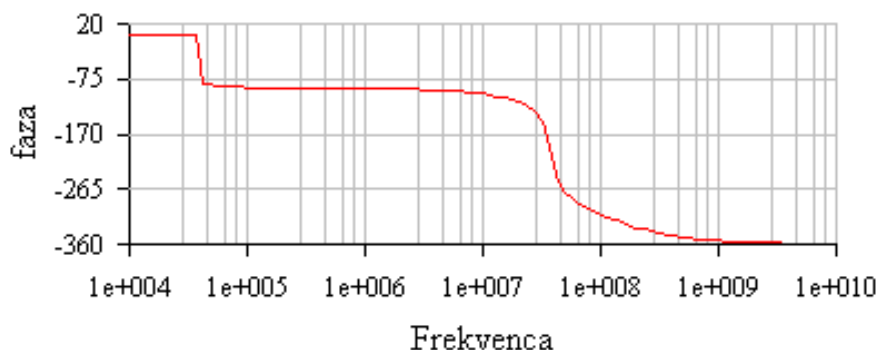
## 4.2.2 Vhodni filter

Kot že povedano je ta sestavljen iz dveh kondenzatorjev C1 in C2 ter tuljave L1. V tem vezju ima filter pomembno nalogo, saj določa spodnjo mejno frekvenco ojačevalnika in le-te ni potrebno izračunavati pri analizi obeh tranzistorjev.

Naš filter je zgrajen tako, da duši nizke frekvence, vse do frekvence 46 MHz, kjer ima 2 pola. Z analizo v programu Electronics Workbench sem dobil sledečo karakteristiko:



*Slika 2: Frekvenčni potek vhodnega filtra*



*Slika 3: Potek faze filtra*

## 4.2.3 Ojačevalna stopnja 1

Tranzistor 1 je širokopasovni tranzistor BFY90. Elementi, ki so naj priključeni in njihova funkcija pa je sledeča:

- **upor R1:** Ta upor, ki je v povratni vezavi, nam določa delovno točko in ima tudi funkcijo pri visokih frekvencah. Gre namreč za negativen napetostno-tokoven sklop, ki nam omogoča razširitev pasovne širine ojačevalnika. Sklop je sicer frekvenčno odvisen, lahko pa ga s pomočjo Millerjevega teorema preslikamo na vhod tranzistorja kot:



$$R_N = \frac{R_F}{1 + A_{U1}}, R_F = R1$$

Tudi transformirana upornost pa je frekvenčno odvisna, kar bomo do neke mere upoštevali tudi pri analizi.

- **upor R2:** Upor R2 je v povratni vezavi prav tako predstavlja negativni tokovno-napetostni povratni sklop, ki poveča vhodno impendanco in zmanjša strmino stopnje in s tem doseže razširitev frekvenčnega področja. Upor lahko preko Millerjevega teorema transformiramo na vhod, kjer nam povzroči povečanje zunanje bazne upornosti na  $r_{BB'} + R2$ , povečanje interne vhodne upornosti  $r_{B'E}$  s faktorjem  $k_E$  in zmanjšanje interne vhodne kapacitivnosti  $C_{B'E}$  z enakim faktorjem. Faktor  $k_E$ :  $k_E = 1 + g_m \cdot R_E, R_E = R2$
- **upor R3:** Upor R3 predstavlja breme tranzistorja in določa delovno točko ter napetostno ojačanje tranzistorskega vezja.
- **kondenzator C3:** Ta kondenzator nam da še dodatno razširitev frekvenčne širine. S tem namreč dobimo v emitorsko vejo dodatni ničlo, ki kompenzira upadanje pri frekvenčno neodvisnem povratnem sklopu upora  $R_E$ . Lega dodatne ničle pa mora pri tem biti ustrezna, sicer dobimo prevzpon ojačanja ali neučinkovito kompenzacijo.
- **kondenzator C4:** Kondenzator C4 predstavlja vezni kondenzator. Na ta način omogočimo prehod izmeničnemu signalu z izhoda ene na vhod naslednje stopnje, pri čemer sta stopnji galvansko ločeni. Kondenzator se nabije na napetostno razliko med enosmerno izhodno napetostjo prve stopnje in enosmerno napetostjo naslednje stopnje. V stacionarnih sistemih se tako delovne točke stopenj ne spremenijo.
- **tuljava L2:** Dodajanje tuljave na tem mestu v vezju nam zmanjša vpliv na vhod transformiranega kondenzatorja  $C_{B'C}$  ob uporabi visokofrekvenčnega modela tranzistorja in zadrži ojačanje še preko običajne zgornje frekvenčne meje ojačevalnega vezja. Ta vpliv bom pri svojih izračunih zanemaril, ker ne igra bistvene vloge v vezju, treba pa se je hkrati zavedati kakšen učinek ima na vezje. Tuljave v taki vezavi so značilne prav za visokofrekvenčne ojačevalnike.

#### 4.2.4 Ojačevalna stopnja 2

Ojačevalno vezje 2 okoli tranzistorja 2 se mnogo ne razlikuje od ojačevalnega vezja okoli tranzistorja 1. Analiza je zelo podobna. Elementi imajo sledeče funkcije:

- **upor R5:** Ima enako funkcijo kot R1.
- **upor R4 in kondenzator C5:** Ta del vezja dobi svoj učinek šele pri visokih frekvencah. Ko je frekvenca dovolj visoka začne C5 prevajati in takrat moramo pri analizi vezja upoštevati tudi R4, ki ga pri izračunu delavne točke in za nizke frekvence ni bilo potrebno. Pri

visokih frekvencah je torej povratna vezava (če zanemarimo L3) pri tranzistorju 2 manjša in znaša:

$$R_p = R5 \parallel R4 = \frac{R5 \cdot R4}{R5 + R4}$$

- **upor R7:** Ima enako funkcijo kot R2.
- **upor R6:** Ima enako funkcijo kot R3.
- **kondenzator C6:** Ima enako funkcijo kot C3.
- **kondenzator C7:** Ima enako funkcijo kot C4
- **.tuljava L3:** Ima enako funkcijo kot L2.

S pomočjo vsega povedanega sledi analiza ojačevalnega vezja. Kot že povedano spodnje frekvenčne meje ne bomo računali, ker je določena z vhodnim filtrom.

Pri visokih frekvencah nam začne padati vrednost  $\beta$ . Za  $\beta_{VF}$  sem zato vzel vrednost 50, kar je nekaj višje od minimalne vrednosti  $\beta$  v podatkih za tranzistor. Zaradi tega padca sem ponovno izračunal vhodno upornost 2. stopnje pri čemer sem tudi upošteval, da pri visokih frekvencah kondenzator C5 prevaja in to pomeni, da se spremeni povratna vezava iz R5 v Rp:

$$Z_{vh2vf} := \text{Par}\left(\beta_{vf} \cdot r_{e2}, \frac{R_p}{1 - A_{u2}}\right)$$

$$Z_{vh2vf} = 28.007 \quad \blacksquare$$

Zato pa se spremeni tudi vrednost  $A_{U1}$ :

$$A_{u1vf} := 1 - g_{m1} \cdot \left( R3 \cdot \frac{Z_{vh2vf}}{R3 + Z_{vh2vf}} \right)$$

Nadalje sem potem naredil nadomestno vezje, ampak pri tem nisem upošteval C3, ker ga bom upošteval kasneje. Potrebna je bila uporaba obeh Millerjevih teoremov kot smo to naredili na vajah. Nato sem izračunal nadomestno upornost in kapacitivnost in izračunal zgornji pol vezja:

$$k_{e1} := 1 + g_{m1} \cdot R2$$

$$C_{m1} := C_{bc} \cdot (1 + g_{m1} \cdot (R2 + \text{Par}(R3, Z_{vh2vf})))$$

$$R_{nzg1} := \text{Par}\left(\text{Par}\left(\frac{R1}{1 - A_{u1vf}}, R_g\right) + r_{bb} + R2, \beta_{vf} \cdot r_{e1} \cdot k_{e1}\right)$$

$$C_{nzg1} := \frac{C_{m1} + C_{be}}{k_{e1}}$$

$$f_{zg1} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{nzg1} \cdot R_{nzg1}}$$

$$f_{zg1} = 2.21 \cdot 10^8 \quad \blacksquare$$

Sedaj pa je potrebno upoštevati še C3. Razlog, da to nismo storili že prej je, da mora biti njegova vrednost pravilno določena sicer pride do prevzpona ojačanje ali neučinkovite kompenzacije kot že opisano v opisu C3. Sedaj moramo torej ničlo postaviti v fzg1 in nato izračunati vrednost C3 :

$$C_{np1} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R2 \cdot f_{zg1}}$$

$$C_{np1} = 4.801 \cdot 10^{-11} \quad \blacksquare$$

Izračunan vrednost se razlikuje od C3, ki je podan v vezalni shemi vezja. Do tega je prišlo zato, ker sem od načrtovalcev vezja izvedel je bil ojačevalnik konstruiran po praktični poti, kar pomeni, da so bili v vezje vstavljeni elementi, ki so najbolj delovali in ni bila uporabljena natančna analiza. Zato se v vezju skriva še mnogo parazitnih kapacitivnosti in induktivnosti, ki nam kvarijo karakteristiko. To je značilno za tak tip vezij kot je moj ojačevalnik, ki ima elemente spajkane kar po "zraku". Izračunane vrednosti pa bom uporabil pri analizi z programom Electronics Workbench, kjer bo vidno, če so vrednosti kolikor toliko pravilno izračunane. Nadalje tu potem izračunamo še nov pol. V ta namen moramo narediti novo nadomestno vezje in izračunati nadomestno upornost:

$$R_{vf1} := \text{Par} \left[ \text{Par} \left( \frac{R1}{1 - A_{u1vf}}, R_g \right) + r_{bb} + \beta_{vf} \cdot r_{e1}, R2 \cdot (\beta_{vf} + 1) \right]$$

$$f_{zg12} := \frac{1}{\frac{C_{np1}}{\beta_{vf}} \cdot R_{vf1} \cdot 2 \cdot \pi}$$

$$f_{zg12} = 4.201 \cdot 10^8 \quad \blacksquare$$

Sedaj je potrebno za ojačevalno stopnjo 1 izračunati še ojačanje. Tudi tega dobimo iz nadomestne vezave podobno kot na vajah:

$$A_{01} := g_{m1} \cdot R_3 \cdot \left( \frac{Z_{vh2vf}}{R_3 + Z_{vh2vf}} \right) \cdot \frac{r_{e1} \cdot \beta_{vf}}{r_{e1} \cdot \beta_{vf} + r_{bb} + R2} \cdot \frac{R_{vh1}}{R_{vh1} + R_g}$$

$$R_{vh1} := \text{Par}(r_{bb} + R2, r_{e1} \cdot \beta_{vf} \cdot k_{e1}) + \frac{R1}{1 - A_{u1vf}}$$

$$A_{01} = 1.828 \quad \blacksquare$$

Ojačanje, ki ga dobimo ni veliko, kar pa gre pripisati številnim povratnim povezavam, ki so nam le-tega znižale.

Za 2 ojačevalno stopnjo izhajamo iz enakih predpostavk in na enak način izračunamo enake količine kot pri 1. ojačevalni stopnji:

$$k_{e2} := 1 + g_{m2} \cdot R7$$

$$C_{m2} := C_{bc} \cdot \left[ 1 + g_{m2} \cdot \left( R7 + R6 \cdot \frac{R_{izh}}{R_{izh} + R6} \right) \right]$$

$$R_{nzg2} := \text{Par} \left( \frac{R_p}{1 - A_{u2}} + r_{bb} + R7, \beta_{vf} \cdot r_{e2} \cdot k_{e2} \right)$$

$$C_{nzg2} := \frac{C_{m2} + C_{be}}{k_{e2}}$$

$$f_{zg2} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C_{nzg2} \cdot R_{nzg2}}$$

$$f_{zg2} = 2.214 \cdot 10^8 \quad \blacksquare$$

$$C_{np2} := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_7 \cdot f_{zg2}}$$

$$C_{np2} = 4.793 \cdot 10^{-11} \quad \blacksquare$$

$$R_{vf2} := \text{Par} \left[ \left( \frac{R_p}{1 - A_{u2}} \right) + r_{bb} + \beta_{vf} \cdot r_{e2}, R_7 \cdot (\beta_{vf} + 1) \right]$$

$$f_{zg22} := \frac{1}{\frac{C_{np2}}{\beta_{vf}} \cdot R_{vf2} \cdot 2 \cdot \pi}$$

$$f_{zg22} = 6.168 \cdot 10^8 \quad \blacksquare$$

Ojačanje:

$$R_{vh2} := \text{Par} \left( r_{bb} + R_7 + k_{e2} \cdot r_{e2} \cdot \beta_{vf}, \frac{R_p}{1 - A_{u2}} \right)$$

$$A_{02} := g_{m2} \cdot \left( R_6 \cdot \frac{R_{izh}}{R_6 + R_{izh}} \right) \cdot \frac{\beta_{vf} \cdot r_{e2}}{\beta_{vf} \cdot r_{e2} \cdot k_{e2} + (r_{bb} + R_7)}$$

$$A_{02} = 3.106 \quad \blacksquare$$

Celotno ojačanje:

$$A_{cl} := A_{02} \cdot A_{02}$$

$$A_{cl} = 9.648 \quad \blacksquare$$

$$20 \cdot \log(A_{cl}) = 19.689 \quad \blacksquare$$

Pri zgornjih frekvencah moramo upoštevati nižjo od obeh stopenj, kajti ta omejuje karakteristiko ojačanja.

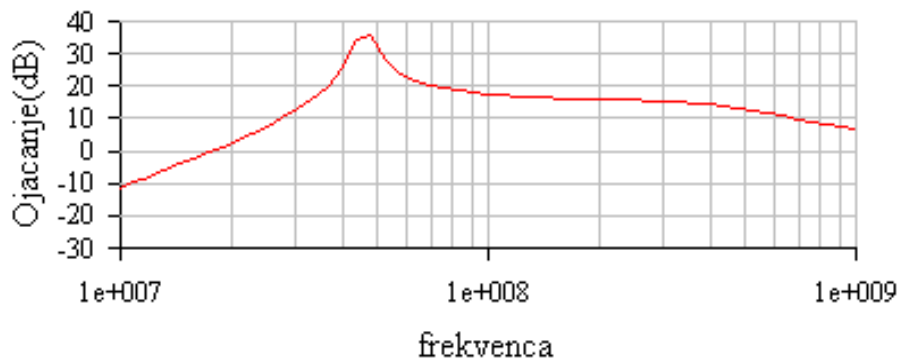
#### 4.2.5 Analiza z programom Electronics Workbench

Za analizo v programu Electronics Workbench je za dobro analizo potreben podroben model tranzistorja, ki ga uporabljamo. Tranzistor BFR90 pa je že nekoliko zastarel in zanj nisem uspel najti ustreznega modela. Zato sem uporabil moderen tranzistor BFR90A. Zanj sem dobil podatke na strani korporacije Philips Semiconductors:

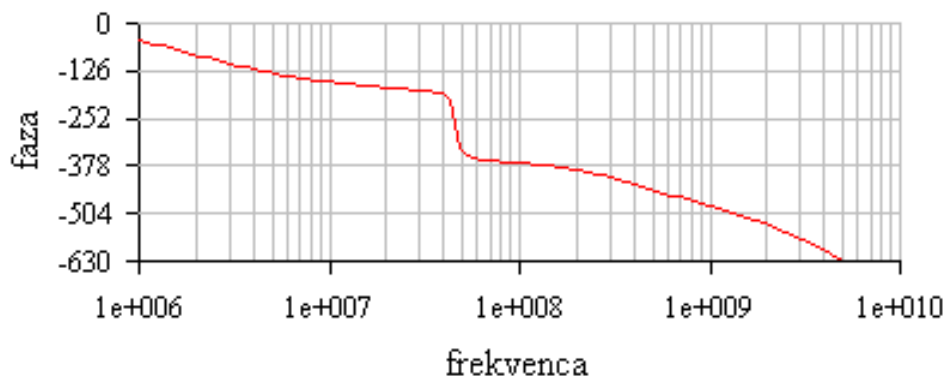
(<http://www.semiconductors.philips.com/models/spicespar/data/BFR92A.html>)

Ker gre za mnogo boljši tranzistor od uporabljenega v vezju so tudi rezultati zelo dobri.

Najprej sem vse elemente vezja vstavil z enakimi vrednostmi kot v vezalni shemi in sem dobil rezultate v obliki Bodejevega diagrama na sliki 4 in 5. Vidimo, da imamo precejšen prevzpon in slabo karakteristiko, kar potrjuje trditev, da nam v vezju manjka precej elementov, ki so parazitske narave, da bi lahko izračunali pravo karakteristiko.

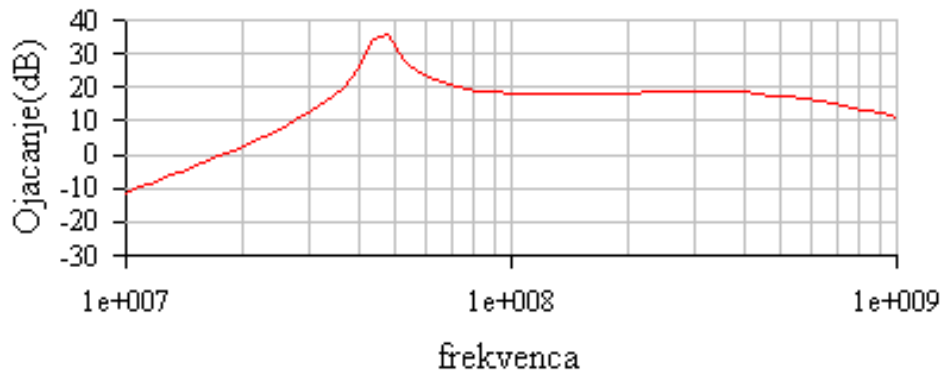


**Slika 4: Bodejev diagram ojačevalnika - ojačanje (elementi vezalne sheme)**



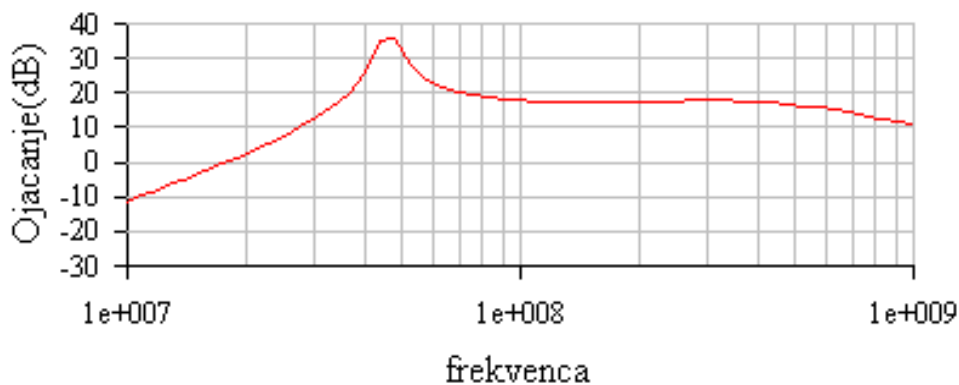
**Slika 5: Bodejev diagram ojačevalnika – fazni potek (elementi vezalne sheme)**

Potem pa sem v modelu uporabil Cnp1 in Cnp2 izračunana zgoraj, da bi preveril svoj izračun. Bodejev diagram teh modelov je prikazan na sliki 6 in 7. Vidimo, da je prišlo do izboljšanja karakteristike, saj je prevzpon manjši in ojačanje bolj konstantno do nekaj višje frekvence. Opaziti pa je tudi prevzpon ojačanja preden ojačanje začne padati.



**Slika 6: Bodejev diagram ojačevalnika - ojačanje (izračunana Cnp1 in Cnp2)**

Ko sem se malo poigral z velikostjo Cnp1 in Cnp2, sem ugotovil, da je vrednost Cnp1 že optimalna, medtem ko je bila za Cnp2 optimalna vrednost 25 pF, kar je nekoliko manj kot je izračunana. Za to vrednost je Bodejev diagram na sliki 7.

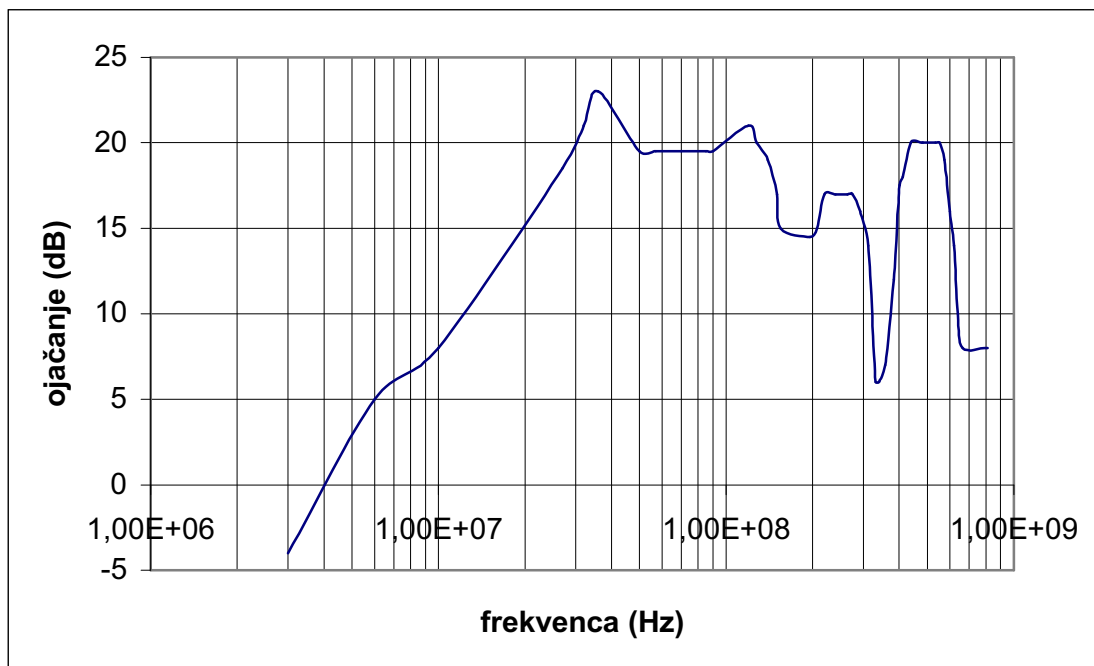


**Slika 7: Bodejev diagram ojačevalnika - ojačanje (optimalno)**

## 5. Rezultati meritev

### 5.1 Meritev z frekvenčnim generatorjem in oscilatorjem

Meritve mojega vezja sem izvedel s pomočjo frekvenčnega generatorja in osciloskopa. Rezultate meritev pa izrisal s pomočjo računalnika. Potek ojačanja je na sliki 8. Vidimo, da je potek vse prej kot konstanten in precej niha. Kot že nekajkrat povedano gre to na račun parazitnih elementov, dejstva, da ohišje oziroma vezje ni v kovinskem ohišju (ni ščitenja pred motnjami), slabe izvedbe samega vezja, popačenja inštrumentov in nenazadnje tudi pa tudi napak pri merjenju.

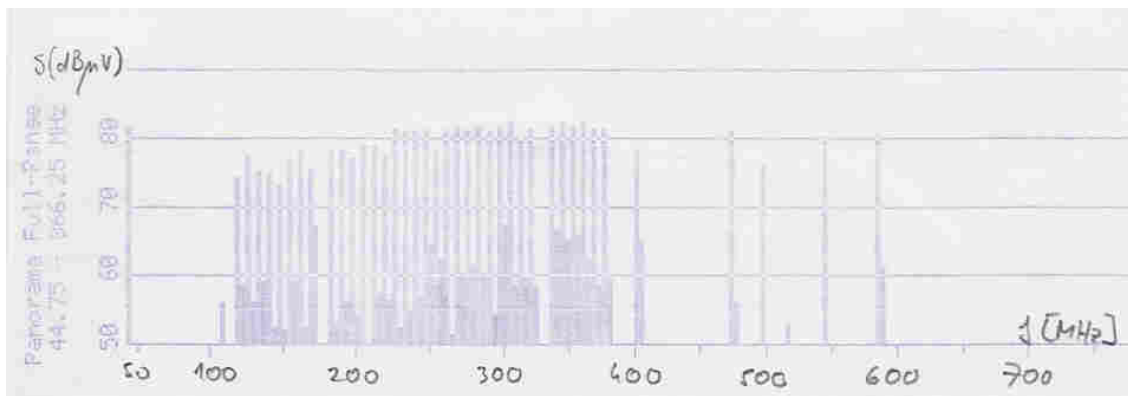


*Slika 8: Frekvenčni spekter vezja izmerjen z signalnim generatorjem in osciloskopom*

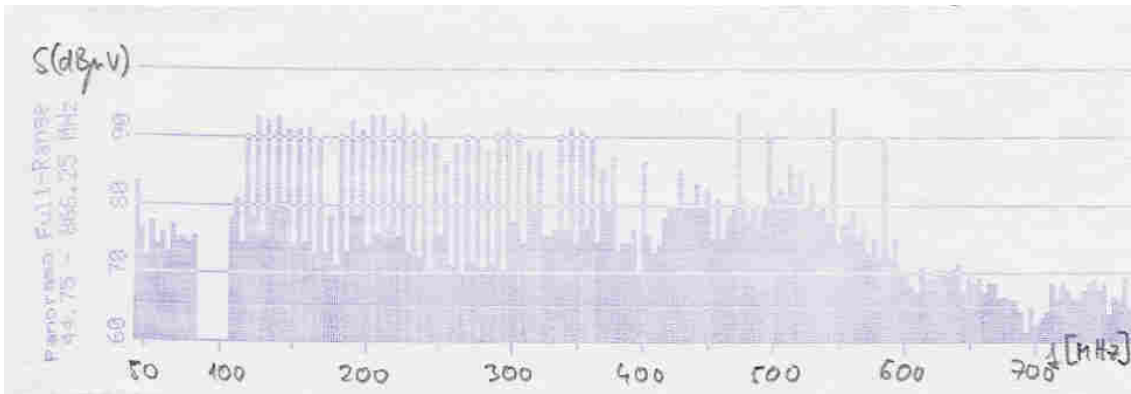
## 5.2 Meritev z merilnikom TV/radio signalov

Pri meritvi sem uporabil merilnik TV/radio Kathrein MFK55, ki ima možnost izpisa rezultatov in ima vgrajen tudi spektralni analizator na osnovi FFT (hitre Fourierove transformacije). Za meritev sem potreboval še antenski napajalnik za napajanje vezja ter atenuatorja 10 dB in 6 dB.

Najprej sem izmeril kabelski/RF signal in naredil izpis le-tega (slika 9). Nato sem ta TV signal ojačal še z ojačevalnikom. Dobljen rezultat (slika 10) kaže, da je bil vhodni signal premočan in da je prišlo do prekrmiljenja ojačevalnika, ki je začel oscilirati, saj nastanejo številne nove frekvenčne komponente. Tudi TV slika, ki sem jo gledal na ekranu merilnika ni bila več čista.

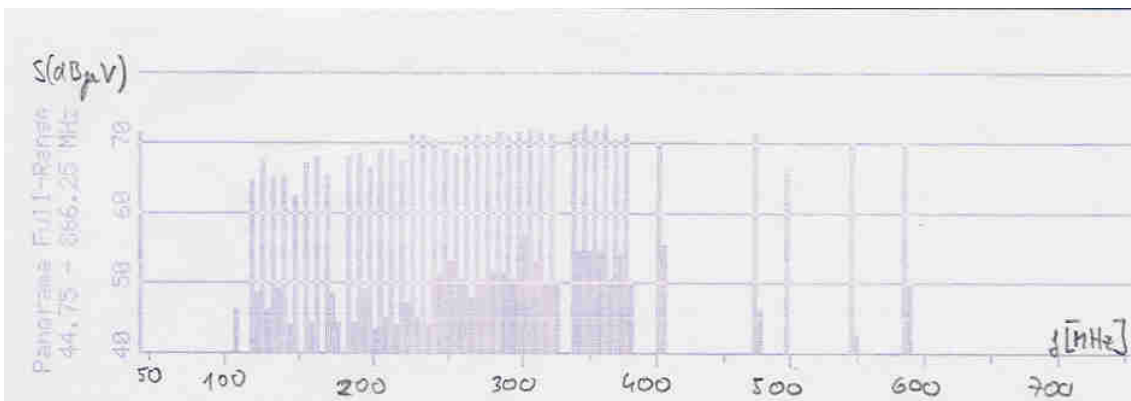


*Slika 9: Spekter vhodnega TV signala*

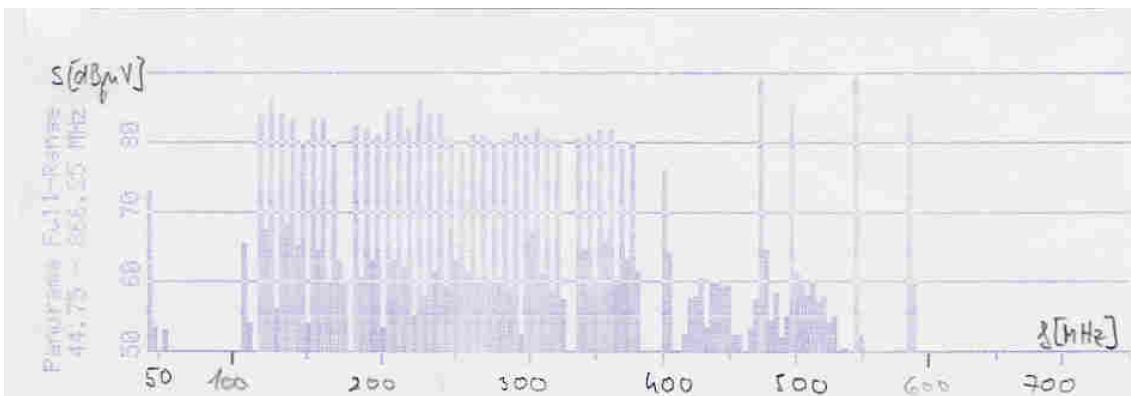


**Slika 10: Izhodni spekter iz ojačevalnika**

Več kot očitno je torej bilo, da je potrebno vhodni TV signal oslabiti. To sem storil z atenuatorjem 10 dB. Vhodni spekter, ki sem ga dobil je prikazan na sliki 11. Nato sem ta vhodni signal ojačal z ojačevalnikom. Izhodni spekter, ki sem ga dobil je na sliki 12. Vidimo, da je tudi tokrat prišlo do prekrmljenja, saj se pojavijo nezaželene komponente, ki so najbolj vidne med frekvencama 400 in 550 MHz.



**Slika 11: Spekter vhodnega TV signala ob atenuatorju 10 dB**

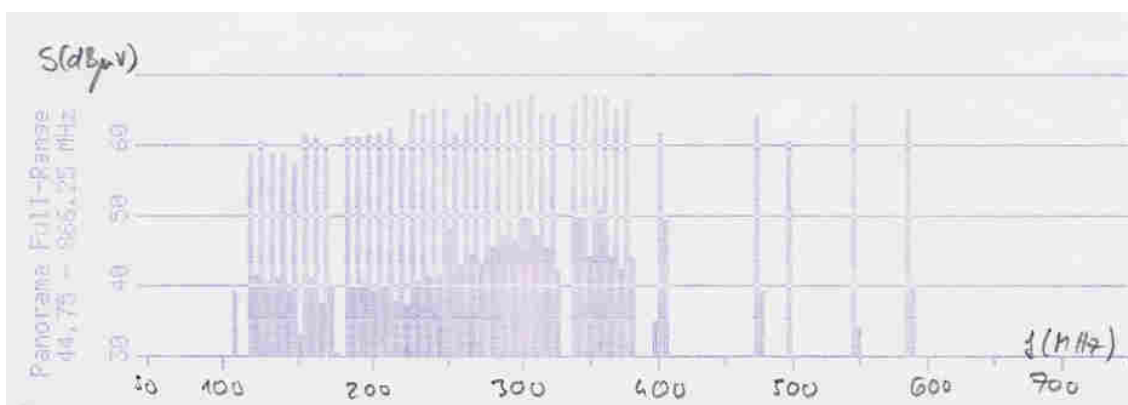


**Slika 12: Izhodni spekter iz ojačevalnika ob atenuatorju 10 dB**

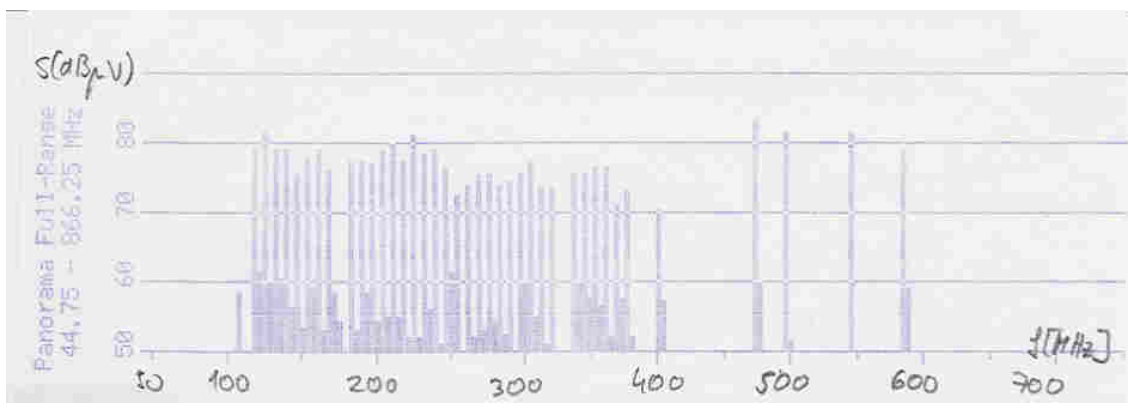


Potrebno je bilo torej signal še dodatno oslabiti in to sem storil z še dodatnim 6 dB atenuatorjem (skupaj torej 16dB). Slika 13 prikazuje vhodni spekter TV signala. Na sliki 14 pa vidimo izhodni spekter TV signala iz ojačevalnika. Vidimo, da to pot ni nobenih vidnih nezaželenih frekvenčnih komponent, torej sta tranzistorja zdržala nivo vhodnega signala. Primerjava med vhodnim in izhodnim spektrom nam omogoča tudi, da preverimo karakteristiko ojačanja ojačevalnika.

Ugotovimo pa tudi še eno lastnost ojačevalnika. In sicer kolikšen vhodni nivo zdrži pri vhodnem spektru 35 kanalov. Glede na moje meritve bi bilo to približno 64 dB $\mu$ V +/- 2 dB.



**Slika 13: Spekter vhodnega signala ob atenuatorju 16 dB**



**Slika 14: Izhodni spekter iz ojačevalnika ob atenuatorju 16 dB**

## 6. Zaključek

Delovanje mojega vezja ni optimalno. Frekvenčni potek ni povsod konstanten saj ima tako padce ojačanje kot prevzpone. Del te slabe karakteristike gre pripisati mojim omejenim spajkalnim izkušnjam in sposobnostim, ki pridejo do izraza predvsem pri takih vezjih z elementi vezanimi

v zraku. Drugi del pa gre pripisati dejstvu, da je pričujoč ojačevalnik izveden z tranzistorji starejše generacije, ki nimajo zelo dobrih karakteristik.

Izračuni se po mojem mnenju dobro ujemajo z rezultati dobljenimi s pomočjo programa Electronics Workbench in so smiselni. Zaradi že znanih razlogov pa se ne ujemajo najbolje z praktičnimi rezultati, vendar tega nisem niti pričakoval in sem zadovoljen z rezultati analize.

Vendar po mojem mnenju namen naloge ni bil izdelati idealno delujoče vezje, pač pa, da se spoznamo z spajkanjem in da uporabimo znanje pridobljeno na vajah ter predavanjih za analizo izbranega vezja in v tem smislu zase lahko trdim, da je bil namen dosežen.

Za konec se zahvaljujem še asistentu Umeku za pomoč pri analizi vezja in očetu Marjanu za praktične napotke.

## 7. Literatura

- [Leo94] S.Leonardis. Ojačevalniki. Fakulteta za elektrotehniko, 1994, 1.izdaja  
[Hor89] P. Horowitz, W. Hill. The art of electronics. 1989, 2.izdaja  
Zapiski iz predavanj prof. dr. S.Tomažič in vaj as. dr. A. Umek