

■ TEKST: Mladen Petrović, 9A4ZZ

# VF transformatori impedancije – *baluni* i *ununi* (2. dio)

**B**aluni služe za pretvaranje balansne impedancije u nebalansnu i obratno, a istovremeno mogu vršiti i transformaciju impedancije. Ovdje ću samo razmatrati *balune* (BALanced-UNbalanced) i *unune* (UNbalanced-UNbalanced) koji se koriste na KV područjima. To se odnosi na prilagođenje impedancije antena na napojni vod, kao i balansiranje antena i napojnog voda. Imamo dvije vrste *baluna* po konstrukciji, svaki ima određene prednosti i nedostatke i koristimo jedne ili druge (ovisno o tome što želimo postići). Prvi su konvencionalni transformatori *baluni*, a drugi su prijenosne linije kao *balun* transformatori (TLT).

## KONVENCIONALNI BALUNI

Konvencionalni transformatori *baluni* koriste primar i sekundar te magnetni tok koji prolazi kroz jezgru za prijenos snage, transformaciju impedancije i balansiranje. Ovi su transformatori motani kao transformatori snage. Primar i sekundar su namotani oko jezgre od ferita ili željeznoga praha. Sprega između navoja primara i sekundara ostvaruje se magnetnim tokom (kad frekvencija raste, smanjuju se permeabilitet jezgre i rastu gubici transformacije). Gubici ovise o struji kroz vodiče, o vrtložnim strujama u jezgri i gubitaka histereze pa se ograničava transformacija po snazi i po frekvenciji. Međutim, mogu se postići veliki odnosi transformacije.

Na slici 1. prikazan je *balun* s odnosom transformacije 1:1 izveden kao autotransformator. Točke označavaju početak zavoja. Tri su namotaja *baluna* 1:1 motani trifilarno (jedan uz drugi kako bi se dobila što bolja sprega). Namotano je osam zavoja lakirane žice promjera 1,5 mm na jezgru T200-2. Spojeni su prema slici i na taj je način nesimetrični ulaz 50 Ω transformiran na simetrični izlaz 50 Ω. To možemo prikazati na sljedeći način:

$$n_{pri}^2 / n_{sek}^2 = Z_{pri} / Z_{sek}$$

$$n_{pri} = n_{sek} \times \sqrt{(Z_{pri} / Z_{sek})}$$

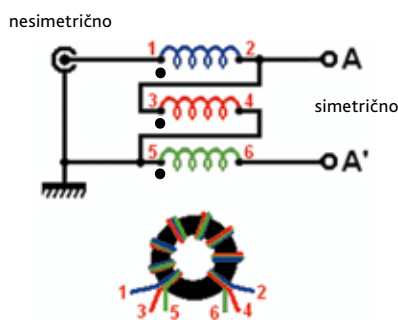
gdje je:  $n_{pri}$  – broj zavoja primara,  
 $n_{sek}$  – broj zavoja sekundara,  
 $Z_{pri}$  – impedancija primara,  
 $Z_{sek}$  – impedancija sekundara.

Nakon upoznavanja osobina jezgre (vidi 1. dio), izabrat ćemo odgovarajuću jezgru za motanje željenog *baluna*. Pri tome ćemo dati objašnjenje izbora broja zavoja i načina motanja. Izbor između feritnih jezgra ili jezgra sa željeznim prahom je određen time da li hoćemo širokopolasni ili uskopojasni transformator i koju ćemo snagu koristiti.

Za istu dimenziju jezgre feritni će materijal prije doći u zasićenje kod puno manje gustoće magnetnog toka nego jezgra od željeznog praha. Permeabilitet za feritne materijale je od 20 μi do 15 000 μi, dok za jezgra od željeznog praha iznosi od 2 μi do 75 μi.

Za širokopolasne krugove se koriste feriti jer imaju veliki permeabilitet. On će dati veći induktivitet uz zadani broj zavoja i dati jaču spregu. Moramo izabrati takav tip ferita koji će imati male gubitke na željenoj frekvenciji. Prvo pravilo za izradu širokopolasnih transformatora je da reaktancija XL zavoja na najnižoj radnoj frekvenciji mora biti najmanje četiri do pet puta veća od impedancije izvora da bi se postiglo što bolje prilagođenje i umanjila reaktivna komponenta.

Kada se radna frekvencija poveća, poveća se i XL zavoja, no efektivni permeabilitet jezgre se smanji. Zbog toga se smanji i induktivitet zavoja na jezgri pa se te dvije posljedice izjednače. XL ostaje isti bez obzira na promjenu frekvencije. Na taj način dobili smo širokopolasni transformator. Što je manje žice upotrebjeno, širina će biti veća. Ako je motanje bifilarno ili višestruko širina će biti veća.



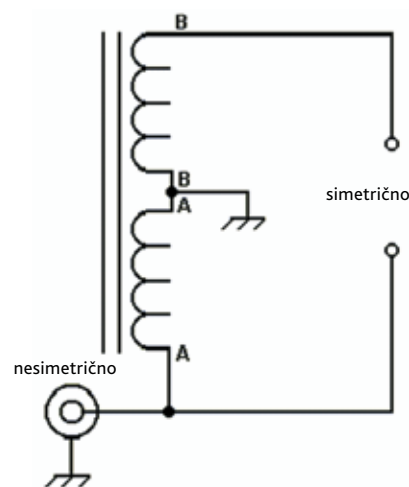
Slika 1. Balun 1:1

Za prijamne transformatore impedancije, npr. za *Beverage* antene i dr., koriste se *baluni* motani na feritnim jezgrima od materijala s velikim permeabilitetom koji rade s malim brojem zavoja. Na taj se način smanjuju gubici u prijemu. Za uskopojasne transformatore koriste se jezgre od željeznog praha koje omogućuju dobar Q-faktor. Materijal od kojih su željezne jezgre napravljene ima visoku otpornost. Induktiviteti napravljeni s ovakvim jezgrama održavaju impedanciju sve do 500 MHz. Zbog većeg temperaturnog koeficijenta koriste se za primjenu u podešenim oscilatornim kolima i filtrima, npr. kod linearnih pojačala.

Često je pitanje do koje snage možemo koristiti jezgru.

Za velike snage koristimo jezgre s malim permeabilitetom, malim gubicima i s velikom *Curie* temperaturom. Takva jezgra može raditi na visokoj temperaturi bez gubitka magnetnih svojstava. Kod feritnih jezgra i jezgara od željeznog praha ograničenje snage je određeno porastom temperature, koja je uzrokovana prije gubicima jezgre nego što je došlo do zasićenja materijala jezgre.

Preko maksimalne gustoće magnetnog toka jezgra definira se snaga koja se može transformirati preko jezgre.



Slika 2. Balun 1:4 motan kao autotransformator

Ona ovisi o efektivnoj površini presjeka jezgra, od permeabiliteta, vrste materijala jezgre, radne frekvencije, broja zavoja, efektivnoga privedenog napona i dobije se maksimalna vrijednost magnetskog toka koja se ne smije prijeći.

Temperaturu jezgara povećava i temperatura žice kojom se "motaju" transformator, kao i temperatura okoline pa i to smanjuje snagu koju jezgra može prenijeti.

Željezne jezgre malog permeabiliteta mogu prenijeti veću snagu nego feriti. To je stoga što za istu induktanciju željezna jezgra zahtjeva više zavoja jer ima manji permeabilitet nego ekvivalentna feritna jezgra što uz isto napajanje uzrokuje smanjenje gustoće magnetskog toka te se jezgra ne pregrijava.

Povećanjem frekvencije opada vrijednost gustoće magnetskog toka,  $B_{max}$ , odnosno snage koja se može prenijeti uz isti napon napajanja, a da se jezgra ne zagrije više od 40°C. Ako se prijeđe maksimalna vrijednost toka, dolazi do pregrijavanja jezgre preko 40°C i do gubitka svojstava jezgre, a kod feritnih jezgara i do uništenja:

$$B_{max} = (E \times 10^2) / (4,44 \times Ae \times N \times f)$$

- $B_{max}$  – maksimalna gustoća magnetskog toka,
- $E$  – efektivni napon napajanja,
- $Ae$  – presjek površine magnetskog puta u  $cm^2$ ,
- $N$  – broj zavoja,
- $f$  – frekvencija (MHz).

Za 1,8 MHz:

$$B_{max} = (25 V \times 100) / (4,44 \times 0,1333 cm^2 \times 15 \times 1,8 MHz) = 156 \text{ gaussa}$$

Za 7 MHz:

$$B_{max} = (25 V \times 100) / (4,44 \times 0,1333 cm^2 \times 15 \times 7 MHz) = 40 \text{ gaussa}$$

Vidimo da ista jezgra može podnijeti veću snagu na nižoj frekvenciji. Budući da radna snaga jezgre ovisi o mnogo faktora, koje je teško jednostavno izračunati, i od odnosa transformacije za koje se jezgro koristi, koristimo podatke mjerenja.

Za feritne jezgre koje se koriste za širokopojasne transformatore od 1,8 MHz do 30 MHz i s odnosom impedancija do 4:1 i maksimalna impedancija ne iznosi više od 300  $\Omega$ , snaga iznosi:

FT-82	50 W.....75 W max
FT-114	100 W.....150 W max
FT-140	300 W.....400 W max
FT-240	1 000 W.....1 500 W max

Za jezgre od željeznog praha koje se koriste u KV odašiljačima u izlaznim stupnjevima, *low pas* filtrima, u rasponu od 1,8 MHz do 30 MHz:

T-37	.....	10 W max
T-50	.....	50 W max
T-68	.....	100 W max
T-106	.....	500 W max

Kod određivanja vrste jezgra za transformator impedancije treba uzeti u obzir mjerenja na radnoj frekvenciji. Kad pravimo *balune* za veće snage moramo omogućiti i prirodno hlađenje jezgre jer može doći do uništenja jezgre. Podaci za izbor adekvatnih jezgara su dani u podacima proizvođača.

### KONSTRUKCIJA BALUNA

Kod motanja širokopojasnog *baluna* moramo voditi računa o nekoliko stvari kako bi oni ispravno funkcionirali.

Induktivna reaktancija (XL) namotaja *baluna* mora biti najmanje četiri puta veća od otpora R tereta koji spaja paralelno s induktivitetom navoja *baluna* i koji želimo transformirati i to na najnižoj radnoj frekvenciji. Ovo zbog toga što pretvaranjem paralelne veze aktivnog otpora R tereta i induktivnog otpora XL zavoja *baluna*, u serijsku vezu, koja se u konačnici koristi, dolazi do smanjenja ukupne vrijednosti induktivnog reaktivnog otpora te nam ostaje čisti aktivni otpor tereta, taj aktivni otpor transformiramo postupkom pravila transformacije.

No, moramo paziti da ne pretjeramo s brojem zavoja *baluna* jer ćemo imati problema na višim frekvencijama željenoga radnog opsega. Trebamo postići transformaciju sa što manjim brojem zavoja, a to postizemo izborom adekvatne jezgre. No, primicanjem zavoja povećat će se induktivitet jezgre i pritom je bitno da ne prelazimo kod motanja toroida 330 stupnjeva punog kruga (kako se ne bi pojavio veći kapacitet između krajeva zavoja te došlo do neželjene rezonancije).

Ovo se može pojaviti prije svega kod uskopojasnih željeznih jezgri, npr. T200. Da bismo dobili širokopojasni transformator treba zavoje žice motati bifilarno ili trifilarno. To omogućava širokopojasnost u odnosu na klasično motanje (odvojeno primara od sekundara) i manje gubitke.

Ako ćemo *balun* koristiti za veće snage poželjno je prije motanja žice jezgro obložiti teflonskom trakom. Na taj način neće doći do mogućeg proboja jezgre i žice pri većim snagama.

### PRIJENOSNI VOD KAO TRANSFORMATOR (TLT)

*Transmission line transformers* (TLT), prijenosni vod kao *balun* transformator, koristi vod za prijenos snage, transformaciju impedancije i balansiranje. Nema gubitaka toka u jezgri jer se snaga ne prenosi preko jezgre kao kod konvencionalnog *baluna*. Time se dobiva veća efikasnost, veća širina opsega i može se prenijeti veća snaga bez gubitaka. Odnos transformacije ograničen je karakterističnom impedancijom linije. Do problema može doći ako linija koju pravimo od dva vodiča i motamo oko jezgre nema potrebnu karakterističnu impedanciju. Kod TLT postoje naponski zavisni gubici koji se javljaju zbog visoke impedancije i SWR-a i to ograničava njihovu upotrebu. TLT transformatore dijelimo na strujne i naponske.

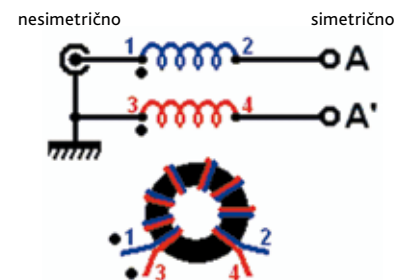
### STRUJNI BALUNI

Guanella je postavio temelj prijenosnih vodova kao transformatora (u daljem tekstu TLT), sa svojim *Basic Building Block* 1:1 *balun* transformatorom.

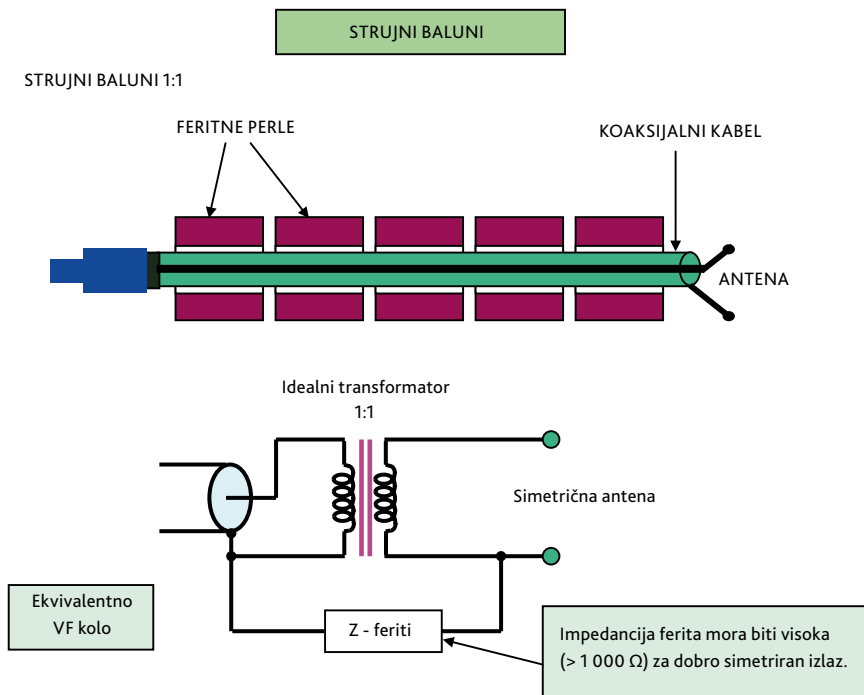
Vidimo na slici 3. da se ulaz, koji je nesimetričan (npr. koaksijalni kabel  $Z = 50 \Omega$ ), prilagođava na teret (npr. dipol antena  $Z = 50 \Omega$ ) koji je simetričan.

Optimalno je kada je  $Z_0$  karakteristična impedancija linije geometrijska sredina ulazne i izlazne impedancije.  $Z_0 = \sqrt{Z_{ul} \times Z_{iz}}$ . U ovom slučaju, najniža radna frekvencija određena je reaktancijom navoja linije koja mora biti deset puta veća od aktivnog otpora tereta R. To znači da moramo koristiti jezgra visokog permeabiliteta – ferite.

Ujedno, namotavanjem linije oko jezgre pored velikog XL dobili smo VF prigušnicu čija reaktancija izolira ulaz od izlaza. Ovo se postiže i ako se nanižu feritne perle oko kabela (slika 4.). Ovaj tip *baluna* se zove strujni *balun* jer se na izlazu javljaju jednake struje, ali suprotnog smjera. No, iako bi teret, odnosno antena bila nesimetrična, ne bi tekla VF struja po kabeu zbog kabela smotanog u VF prigušnicu oko feritne jezgre.



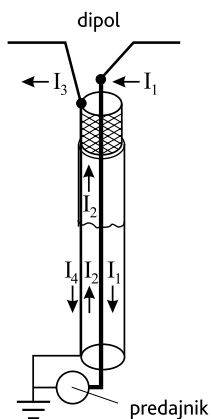
Slika 3. Strujni balun 1:1 (Basic building block)



Slika 4. Strujni baluni

Primjer upotrebe strujnog Guanella baluna je VF prigušnica koji se montira u točki napajanja antena koje imaju malu ulaznu impedancu, tzv. strujno napajane antene poput dipola.

Kod napajanja dipola koaksijalnim kabelom, u kabelu se pojavljuju četiri struje. U centralnom vodiču i jednom kraku dipola teče struja  $I_1$ , a unutar opleta struja  $I_2$ . One su jednake i suprotnog smjera. Uslijed *skin efekta* javlja se struja koja teče izvana po opletu -  $I_4$ , a kroz drugi krak dipola teče struja  $I_3$ . Vidimo da se struja  $I_2$  podijelila na struju  $I_3$  i struju  $I_4$ . Struja  $I_4$  teče niz kabel i uzrokuje zračenje kabela, odnosno izobličenje dijagrama dipola, pa se inducira VF struja u električnim vodovima,

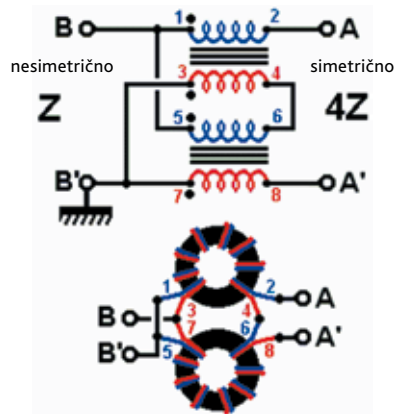


Slika 5. Napajanje dipola

televizijskim, telefonskim i drugim instalacijama što pravi smetnje.

Također se javlja VF energija na kućištu uređaja koja zna biti neugodna na dodir. Umetanjem strujnog baluna između koaksijalnog kabela i dipola prilagodili smo nesimetrični kabel na simetrični dipol pa se struja  $I_4$  poništava. Uz to, imamo i funkciju VF prigušnice koja sprečava da struja poteče niz oplet napojnog voda (slika 5.).

Kombinacijom ovakvih baluna u paralelno-serijskom spoju dobiju se široko pojasni baluni u odnosu 1:ne<sup>2</sup> gdje je n broj transmisionih linija - *Basic Building Block*.



Slika 6. Balun 1:4 (Guanella)

Ako spojimo dva Guanella temeljna bloka kao na slici 6., dobit ćemo balun omjera 1:4. Uz karakterističnu impedanciju linije 100 Ω na ulazu ćemo zbog paralelnog spoja imati 50 Ω, a na izlazu zbog serijskog spoja 200 Ω. Liniju od 100 Ω možemo izračunati prema formuli:

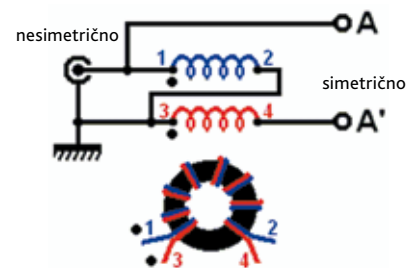
$$Z_0 = 276 \log 2D/d.$$

D = razmak između centra žica,  
d = promjer žice.

Ako upotrijebimo lakiranu žicu Cu promjera 1 mm te motamo bez razmaka dvije takve žice dobit ćemo liniju karakteristične impedancije  $Z_0 = 100 \Omega$ . Dvije su linije spojene paralelno na strani manje impedancije od 50 Ω, a serijski na strani veće impedancije od 200 Ω. S obzirom na to da se radi o linijama impedancije 100 Ω, dobili smo transformaciju impedancije i simetriranje.

### NAPONSKI BALUNI

Ruthroff je je prvi napravio naponski balun, novu tehniku transformacije. Uveo je zbrajanje napona s ulaza sa zakašnjelim naponom izlaza koji se javlja na liniji. Taj se efekt zove *bootstrap* efekt. Kod naponskih baluna naponi na izlazu su jednaki i suprotnog smjera u odnosu prema masi. Time se postiže simetrija te zbog toga teku jednake struje suprotnog smjera. Velika reaktancija linije namotane oko jezgre sprečava tok struje po opletu kabela (ako bi došlo do nesimetrije). Naponski balun funkcionira kao transformator impedancije promjenom odnosa napon/struja izlaza prema ulazu (slika 7.).



Slika 7. Naponski balun 1:4 (Boot strap)

Na slici se vidi *basic building blok* spojen u *boot strap* vezu. Kod baluna 1:4 bifalarno je namotano deset zavoja žice promjera 1,5 mm na jezgri tipa T200-2. Izvodi su spojeni prema slici i na taj smo način nesimetrični ulaz impedancije 50 Ω transformirali na simetrični izlaz 200 Ω.

Možemo zaključiti da se napojni vodovi kao transformatori u pravilu upotrebljavaju kod nižih impedancija. TLT nisu uobičajeni

transformatori kod kojih imamo primar i sekundar, tj. nema odnosa navoja i magnetskog sprezanja između njih.

Najviša radna frekvencija *baluna* određena je odnosom transformacije i veličinom SWR-a, kao i kapacitetom između navoja linije.

Za niže karakteristične impedancije linije moramo upletati vodove, dok za veće  $Z_0$  moramo postići veći razmak između vodova te ih moramo razmaknuti slojem izolacije. Visoki permeabilitet jezgre koristi se za pomicanje najniže radne frekvencije. Nema rasipanja snage u *balunu*. Efikasnost ovih *baluna*, ovisno o impedanciji napojnog voda, je od 95% za  $Z_0 = 200 \Omega$  do 99% za  $Z_0 = 50 \Omega$ .

Kod napojnih vodova tok se poništava te jezgra nije u funkciji prijenosa snage. Zbog toga malim jezgrama možemo postići prijenos velike snage. Stoga se može reći kako je s ispravno napravljenim TLT *balunom* snaga ograničena samo s korektno izrađenim napojnim vodom te pravilnim izborom žice i izolacije s obzirom na očekivane napone i struje.

Oni su posebni za isti slučaj transformacije ovisno o tome koja se impedancija želi transformirati u neku drugu. Primjerice – nije ista konstrukcija *baluna* odnosa 4:1 ako se želi transformirati  $50 \Omega$  na  $12,5 \Omega$  ( $Z_0 = 25 \Omega$ ) i  $50 \Omega$  na  $200 \Omega$  ( $Z_0 = 100 \Omega$ ), jer se radi o liniji koja za svaki od ovih slučajeva treba imati drugačiju karakterističnu impedanciju.



Slika 8. Balun 1:4

Na slici 8. prikazan je *balun* odnosa 1:4, gdje je na feritnu jezgru FT-114-43 namotan vodič za spajanje zvučnika promjera 1,5 mm s pet bifilarnih zavoja. Ovaj vod ima impedanciju približno  $100 \Omega$ , čime je ispunjen uvjet da je impedancija voda  $Z_0 = \sqrt{Z_{ul} \times Z_{iz}}$  pa transformiramo nesimetričnih  $50 \Omega$  na simetričnih  $200 \Omega$  (spoj na slici 7.).

Također se razne kombinacije transformacije postižu kombinacijom *basic building blokova* i *boot strap* kombinacija.

Nakon ovoga upoznavanja s principima rada konvencionalnih *baluna* i TLT *baluna* strujnih i naponskih, u idućem ćemo nastavku donijeti način izrade nekoliko najčešće korištenih *baluna* i *ununa*. 🍷

#### Literatura

1. Sevvick, J. "A Simplified Analysis of the Broadband Transmission Line Transformer",
2. Guanella, G. "Novel Matching Systems for High Frequencies",
3. <http://perso.orange.fr/f5zv>,
4. [www.w8ji.com](http://www.w8ji.com),
5. Radio HRS 5/2008.