

Automatsko antensko prilagođenje – Novi metod u analizi

Mira R. Maljković, dipl.inž.¹⁾
Lidija M. Sajnkar-Velević, dipl.inž.¹⁾

Automatsko antensko prilagođenje se zasniva na principu digitalne komutacije reaktansi i koristi prekidačke elemente kojima se uključuju i isključuju reaktanse u mreži za prilagođenje. To je skup i složen uređaj, pa je ekonomično realizovati programski paket za simulaciju njegovog rada, da bi se efikasnije i jeftinije analizirala tehnička rešenja i algoritami za podešavanje. Predložen je originalni algoritam podešavanja impedanse antene i razvijen softver za simulaciju rada odgovarajućeg antenskog prilagođenja.

Ključne reči: Antensko prilagođenje, automatsko antensko prilagođenje, antene, prilagođenje impedanse.

Korišćene oznake i simboli

B	– susceptansa
C	– kapacitivnost
f	– frekvencija
φ	– faza
G	– provodnost
K_{st}	– koeficijent stojećeg talasa
L	– induktivnost
Q	– Q faktor (faktor dobrote)
R	– otpornost
ρ	– koeficijent refleksije
U	– napon
V_{SWR}	– koeficijent stojećeg talasa (Voltage Standing Wave Ratio)
X	– reaktansa
Y	– admitansa
Z	– impendansa
ω	– učestanost

Uvod

U kratkotalasnom (KT) opsegu dužina antene je 10 m ili duža, i zbog toga je nepraktična za mobilne i polustacionarne sisteme radio-veza. Ovaj problem se prevazilazi korišćenjem kraće antene, ali uz radio-uređaj (RU) se koristi i antensko prilagođenje kao zaseban deo ili kao modul u RU. Da bi sistem RU– antensko prilagođenje – antena zadovoljio uslove potrebne za nove tehnike prenosa, antensko prilagođenje treba da u što kraćem vremenskom intervalu prilagodi antenu na RU. Zato su u primeni automatska antenska prilagođenja (AAP) koja se često nazivaju “brze antenske kutije”.

Digitalna sinteza učestanosti, tranzistorski pojačavači snage, mogućnost preprogramiranja kanala i automatskog upravljanja omogućavaju da KT radio-uređaji ostvare veoma brzu promenu radne frekvencije, što je neophodno u primenama kao što su adaptivne radio-veze, prenos u proširenom spektru, elektronska dejstva i dr. [1].

Glavno ograničenje u pogledu brzine promene radne frekvencije je antensko prilagođenje. Ovaj je problem naročito izražen kod mobilnih i polustacionarnih KT sistema veće snage, koji umesto širokopojasnih antena koriste selektivne štap antene. Impedansa takve antene menja se u širokom rasponu vrednosti, zbog čega varira u velikoj meri i koeficijent stojećeg talasa. Pošto su izlazi pojačavača snage projektovani tako da mogu da rade samo u uskom opsegu promene vrednosti koeficijenta stojećeg talasa, neophodno je korišćenje antenskog prilagođenja koje će da vrši prilagođenje impedanse antene na izlaznu impedansu pojačavača [2,3].

Razvoj mikroprocesora i usavršavanje tehnologije izrade prekidačkih elemenata stvorili su uslove za razvoj novih automatskih antenskih prilagođenja sa kraćim vremenom podešavanja (od nekoliko ms do nekoliko stotina ms).

Pošto je AAP složen i skup uređaj, ekonomično je da se uradi programski paket za simulaciju njegovog rada, da bi se efikasnije i jeftinije došlo do novih tehničkih rešenja AAP i algoritma za podešavanje. U radu je prikazan novi metod analize koji je dat kao programski paket za simulaciju prilagođavanja impedanse antene na nominalnu impedansu radio-uređaja (50Ω) posredstvom odgovarajućeg prilagodnog kola.

Automatsko antensko prilagođenje

Automatsko antensko prilagođenje se zasniva na principu digitalne komutacije reaktansi i koristi prekidačke elemente kojima se vrši uključivanje ili isključivanje reaktansi u mrežu za prilagođenje.

Postojeći uređaji za antensko prilagođenje su podeljeni u dve osnovne grupe:

- širokopojasno prilagođenje i
- uskopojasno prilagođenje.

Širokopojasno prilagođenje koristi fiksnu pasivnu mrežu s dva pristupa, čija je uloga da vrši transformaciju impedanse antene tako da je rezultujući koeficijent stojećeg

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

talasa (K_{st}) manji od zadatog maksimalno dozvoljenog K_{st} u celom opsegu od interesa. Prednosti ovakve realizacije su što je podešavanje trenutno i što se ne zahteva nikakvo upravljanje. Usled postojanja teorijskih ograničenja, ovakvo prilagođenje je nemoguće da se primeni na impedansu štap antene u celom KT opsegu, što je glavni nedostatak ovakve realizacije [4].

Uskopojasno prilagođenje predstavlja uskopojasni LC filtar. Pošto se zahteva prilagođenje u celom KT opsegu, ovo prilagođenje je moguće samo u slučaju da su elementi koji sačinjavaju LC filtar varijabilni, tj. da mogu da se menjaju zavisno od radne frekvencije i karakteristike antene. Ove filtre možemo podeliti u dve osnovne grupe:

- filtri s kontinualno promenljivim vrednostima elemenata i
- filtri s diskretno promenljivim vrednostima elemenata i promenljivom konfiguracijom prilagodne mreže.

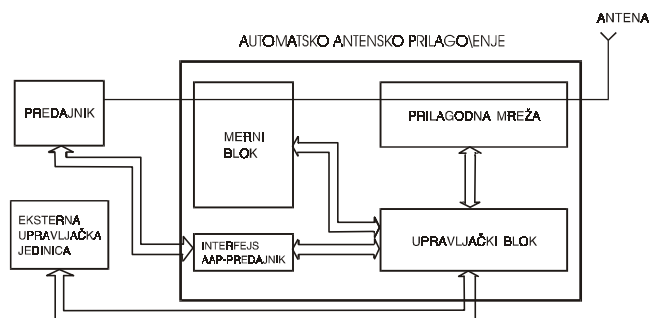
Promena vrednosti elemenata mora da se vrši automatski, zavisno od impedanse antene, i ovakvi uređaji spadaju u klasu uređaja za automatsko antensko prilagođenje.

Uređaj za AAP mora da zadovolji sledeće zahteve, pri čemu neće da degradira karakteristika pojačavača snage, a istovremeno će omogućiti priključenje selektivnih antena na izlaz pojačavača snage:

- proces podešavanja, po dobijanju inicijalnog zahteva za prilagođavanje od strane pojačavača (obično pri promeni radne frekvencije) mora da se odvija potpuno automatizovano;
- proces podešavanja mora da traje što kraće;
- rezultujući koeficijent stojećeg talasa (K_{st}) mora da bude što je moguće manji, ili bar manji od maksimalnog K_{st} koji dozvoljava dati pojačavač;
- koeficijent korisnog dejstva, definisan kao odnos aktivne snage na opterećenju prema direktnoj snazi na izlazu pojačavača, mora da bude što veći;
- uređaj za AAP treba da omogući prikaz informacija o statusu tipa: podešen, nepodešen, podešavanje u toku, uređaj u kvaru i sl., odnosno sve informacije važne za siguran automatski rad [5-8].

Blok šema AAP data je na sl. 1 i sadrži sledeće osnovne blokove:

- prilagodnu mrežu,
- merni blok i
- upravljački blok.



Slika1. Blok šema automatskog antenskog prilagođenja

Impedansa antene

U slučaju mobilnih i polustacionarnih KT sistema (2 do 30 MHz) koriste se selektivne štap antene, čija impedansa značajno varira. Poznavanje impedanse takvih antena je potrebno, radi određivanja konfiguracije prilagodne mreže i vrednosti reaktansi u prilagodnoj mreži, a takođe, i radi određivanja algoritma za podešavanje. Impedansu antene

dobijamo bilo merenjem bilo teoretskim izračunavanjem.

U teoriji su razvijene metode za proračun ulazne impedanse ovakvih antena, ali uz izvesne aproksimacije. Ovakvi proračuni zahtevaju znatna numerička izračunavanja, a dobijeni rezultati važe za idealan slučaj, pa ih treba uzimati s rezervom.

Zbog navedenih razloga, impedansa antene se određuje eksperimentalno u uslovima najpribližnijim realnim uslovima korišćenja antene. Merenje impedanse antene se obično vrši nekim analizatorom impedanse, pri čemu je antena ugrađena na način koji najviše odgovara realnim uslovima njenog korišćenja. Korak merenja (obično 100 kHz) takođe treba brižljivo izabrati. Dobijeni rezultati se koriste za određivanje ekvivalentnog modela određene štap antene, konfiguracije prilagodne mreže i vrednosti reaktansi u prilagodnoj mreži, i za simulaciju algoritma za podešavanje.

Mreža za prilagođenje

Osnovni zadatak mreže za prilagođenje je da vrši transformaciju impedanse antene na izlaznu otpornost pojačavača snage od 50Ω . Mreža za prilagođenje se sastoji od kondenzatora i induktivnosti, čije su vrednosti najčešće u binarnom odnosu ($L_2=2L_1$, $L_3=2L_2$) i te vrednosti su takve da omogućavaju da se impedansa antene prilagodi na izlaznu otpornost pojačavača snage od 50Ω . Induktivna grana mreže za prilagođenje je predstavljena kao:

$$L_k = 2^{k-1} dL$$

$$L = f(S_1, S_2, \dots, S_n) = \sum_{k=1}^n 2^{k-1} S_k \cdot dL \quad S_k \in \{0, 1\}$$

Grana sa kapacitivnim elementima je predstavljena kao:

$$C_k = 2^{k-1} dC$$

$$C = f(S_1, S_2, \dots, S_n) = \sum_{k=1}^n 2^{k-1} S_k dC \quad S_k \in \{0, 1\}$$

gde je: S- prekidač, k- redni broj prekidača.

Zavisno od vrednosti S_k pojedini elementi su isključeni ili uključeni u mrežu.

Binarni odnos omogućuje da se kombinacijom pojedinih elemenata iz skupa dobije vrednost induktivnosti, odnosno kapacitivnosti, s rezolucijom koju definiše element najmanje vrednosti. Važno je da mreža ima dobar stepen korisnog dejstva, jer to smanjuje gubitke pri prenosu snage do antene.

Prilagođenje impedanse može da se vrši na dva načina:

- kao kriterijum prilagođenja se koristi maksimalni transfer snage i
- kao kriterijum prilagođenja se koristi minimalni koeficijent refleksije.

Kriterijum maksimalnog transfera snage podrazumeva da su izlazna impedansa predajnika i ulazna impedansa prilagodne mreže konjugovano kompleksne veličine a takođe su izlazna impedansa prilagodne mreže i impedansa opterećenja konjugovano kompleksne.

Kriterijum minimalnog koeficijenta refleksije podrazumeva da je koeficijent refleksije na izlazu predajnika (ulazu u prilagodnu mrežu) jednak nuli, što je ekvivalentno uslovu konjugovano kompleksnih impedansi na ulazu prilagodne mreže.

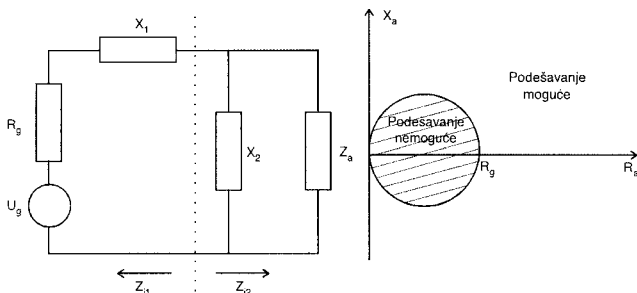
Ukoliko je prilagodna mreža bez gubitaka (beskonačno veliki Q faktor), i ukoliko postoji slaganje konjugovano kompleksnih impedansi bar u jednoj tački mreže, onda postoji slaganje konjugovano kompleksnih impedansi u bilo

kojoj tački mreže. Odatle sledi da je kriterijum minimalnog koeficijenta refleksije, u slučaju prilagodne mreže bez gubitaka, ekvivalentan kriterijumu maksimalnog transfera RF snage.

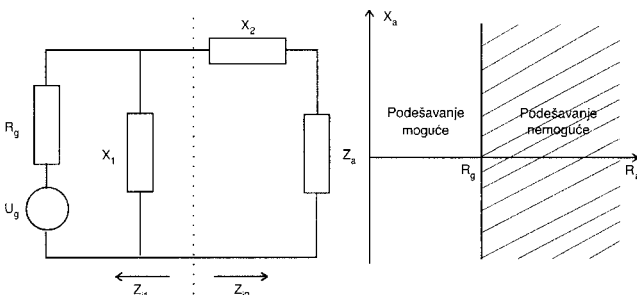
U analizi prilagodne mreže se obično polazi od pretpostavke da je prilagodna mreža bez gubitaka, što omogućava da se kao kriterijum prilagođavanja koristi kriterijum minimalnog koeficijenta refleksije. Većina postojećih uređaja AAP koristi ovaj kriterijum jer je realizacija takvih uređaja mnogo jednostavnija, a u slučaju dovoljno visokog Q faktora, daje približno iste rezultate kao kriterijum maksimalnog transfera snage [9,10].

Problem uskopojasnog prilagođenja svodi se, u principu, na prilagođenje dve proizvoljne kompleksne impedanse pomoću LC prilagodne mreže. Analitičko tretiranje ovog problema je relativno složeno. Pošto će se razmatrati slučaj prilagođenja proizvoljne impedanse Z_a na izlazu impedansu predajnika koja je konstantna i realna u celom KT opsegu ($Z_g = R_g = 50 \Omega$), analiza će da bude znatno uprošćena. Minimalna mreža za prilagođenje, u ovom slučaju, se sastoji od dve reaktanse. Mrežom od jedne reaktanse je nemoguće, u opštem slučaju, da se izvrši prilagođenje ovakvih impedansi. Mrežom od jedne reaktanse moguće je da se izvrši poništavanje imaginarnog dela impedanse Z_a (kompenzacija), što nije dovoljan uslov za prilagođenje po snazi.

Posmatrana je L mreža s dve osnovne konfiguracije (sl.2 i sl.3). Na sl.2 je prikazana L mreža sa paralelnom reaktansom na strani opterećenja, a na sl.3 L mreža sa paralelnom reaktansom na strani generatora.



Slika 2. L mreža s paralelnom reaktansom na strani opterećenja



Slika 3. L mreža s paralelnom reaktansom na strani generatora

Za konfiguraciju na sl.2 sa paralelnom reaktansom na strani opterećenja, iz uslova prilagođenja po snazi, sledi:

$$Z_{i1}^* = Z_{i2} \quad (1)$$

$$Z_{i1} = R_g + jX_1 \quad (2)$$

$$Z_{i2} = jX_2 \cdot (R_a + jX_a) / (R_a + jX_a + jX_2) \quad (3)$$

Zamenom (2 i 3) u (1) i izjednačavanjem realnih i

imaginarnih delova tako dobijene jednakosti, dobija se sistem jednačina po promenljivim X_1 i X_2 . Rešavanjem sistema jednačina dobija se izraz:

$$R_a^2 + X_a^2 - R_g \cdot R_a > 0 \quad (4)$$

Prethodni izraz u graničnom slučaju može da se napiše u obliku:

$$(R_a - R_g / 2)^2 + X_a^2 = (R_g / 2)^2 \quad (5)$$

što predstavlja jednačinu kružnice u ravni Z_a sa centrom u tački $(R_g/2, 0)$ i poluprečnikom $R_g/2$.

Prilagođenje mrežom na sl.2 je moguće, kada impedansa antene $Z_a = R_a + jX_a$ zadovoljava nejednakost (4). Grafički prikaz u Z_a ravni je dat na sl.2. Šrafirana je oblast u kojoj nije moguće podešavanje sa konfiguracijom L mreže sa paralelnom reaktansom prema opterećenju.

Uslov (4) je opšti uslov egzistencije rešenja pri prilagođenju L mrežom sa paralelnom reaktansom na strani opterećenja.

U slučaju L ćelije sa paralelnom reaktansom prema generatoru (sl.3), postavljanjem jednačina (1 i 2) za imać impedanse i uz izvođenja, analogna prethodnom slučaju, dobijaju se rešenja po X_1 i X_2 u obliku:

$$X_1 = \pm R_g \cdot \sqrt{R_a \cdot (R_g - R_a)} / (R_a - R_g) \quad (6)$$

$$X_2 = -X_a \pm \sqrt{R_a \cdot (R_g - R_a)} \quad (7)$$

Pošto su X_1 i X_2 realne vrednosti, potkoreni izraz mora da bude veći od nule, odnosno:

$$R_g - R_a > 0 \quad (8)$$

U graničnom slučaju je $R_a = R_g$ što predstavlja jednačinu prave u Z_a ravni. Grafički prikaz oblasti u kojoj je podešavanje moguće, dat je na sl.3.

Zavisno od prirode reaktansi X_1 i X_2 , egzistiraju oblasti u Z_a ravni u kojima je podešavanje moguće. Reaktanse X_1 i X_2 mogu da budu kapacitivnog ili induktivnog karaktera. Za L mrežu sa sl.2, sa paralelnom reaktansom na strani potrošača, moguća su četiri slučaja:

- X_1 kapacitivno, X_2 induktivno ($X_1 < 0, X_2 > 0$),
- X_1 induktivno, X_2 kapacitivno ($X_1 > 0, X_2 < 0$),
- X_1 kapacitivno, X_2 kapacitivno ($X_1 < 0, X_2 < 0$),
- X_1 induktivno, X_2 induktivno ($X_1 > 0, X_2 > 0$).

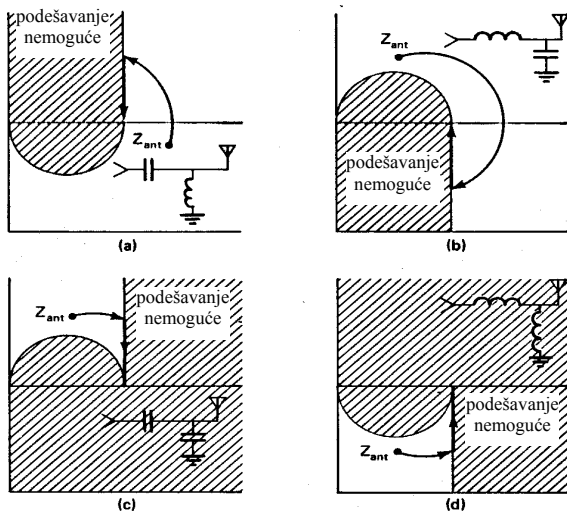
Za L mrežu na sl.3, sa paralelnom reaktansom na strani generatora, moguća su, takođe, četiri slučaja:

- X_1 kapacitivno, X_2 kapacitivno ($X_1 < 0, X_2 < 0$),
- X_1 induktivno, X_2 induktivno ($X_1 > 0, X_2 > 0$),
- X_1 kapacitivno, X_2 induktivno ($X_1 < 0, X_2 > 0$),
- X_1 induktivno, X_2 kapacitivno ($X_1 > 0, X_2 < 0$).

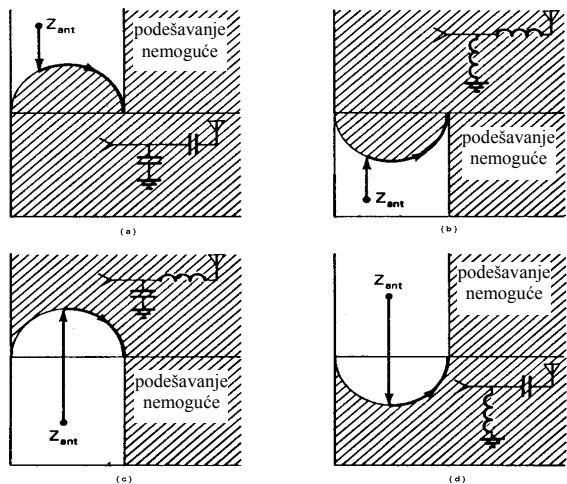
Mogući izgledi prilagodne mreže, zajedno sa svojim zonama podešavanja, dati su na sl.4, za L mrežu s paralelnom reaktansom na strani opterećenja, i sl.5 za L mrežu s paralelnom reaktansom na strani generatora.

Grafičko predstavljanje zone podešavanja olakšava analizu i omogućuje određivanje tipa prilagodne mreže, na osnovu impedanse opterećenja Z_a bez numeričkog proračunavanja. Na slikama 4 i 5 se vidi da su neke od zona podešavanja komplementarne, tako da se s minimalno dve L mreže može "pokriti" cela desna strana ravni Z_a . Kombinacijom komplementarnih slučajeva mogu da se

realizuju mreže, čija je zona podešavanja cela desna poluravan kompleksne impedanse.



Slika 4. Prilagodne mreže sa zonama podešavanja za L mrežu s paralelnom reaktansom na strani opterećenja



Slika 5. Prilagodne mreže sa zonama podešavanja za L mrežu s paralelnom reaktansom na strani generatora

Na ovaj način je pokazano da se minimalna mreža kojom je moguće prilagoditi proizvoljnu impedansu iz desne poluravni kompleksne impedanse sastoji od tri reaktanse i da može da ima oblik PI ili T mreže, pri čemu paralelna reaktansa mora da ima suprotan znak od serijske reaktanse. Odluka o tome, koji će tip mreže da se primeni, zavisi od mogućnosti praktične i tehnološke realizacije mreže.

Merni blok

Zadatak mernog bloka jeste da daje informacije, na osnovu kojih će upravljački blok prilagoditi impedansu antene na izlaznu impedansu predajnika. Vrsta informacije, koju daje merni blok, zavisi od tipa prilagodne mreže i algoritma podešavanja.

Proces podešavanja uređaja za AAP je iterativan i sastoji se od naizmeničnog merenja ulazne impedanse prilagodne mreže Z_{ub} , zatvorene impedansom antene Z_a na izlazu prilagodne mreže i promene konfiguracije prilagodne mreže u skladu s nekim od algoritama za podešavanje. Korektno odvijanje procesa podešavanja, saglasno usvojenom algoritmu, uslovljeno je što tačnijim merenjem ulazne impedanse, ili neke druge veličine, na osnovu koje je moguće da se definiše algoritam podešavanja. Takva je veličina, npr. kompleksni

koficijent refleksije.

Različita rešenja mernog bloka u AAP su uslovljena nekim od sledećih faktora:

- da li merni blok zahteva da predajnik radi tokom podešavanja;
- da li je moguće merenje u toku podešavanja, ili i u toku rada predajnika punom snagom;
- kakva je linearnost mernog bloka, tj. da li tačnost mernog bloka zavisi od nivoa RF snage i koji je opseg mogućih promena RF snage;
- kolika je tačnost mernog bloka;
- kakav je uticaj mernog bloka na impedansu koja se meri;
- kakav je uticaj signala indukovanih u sopstvenoj predajnoj anteni na tačnost merenja impedanse, ako se predajnik nalazi u blizini drugih predajnih antena.

Merni blok, koji se koristi u uređajima za AAP, sastoji se iz dva osnovna podsklopa:

- dela za izdvajanje mernih signala proporcionalnih struji, naponu ili direktnoj i reflektovanoj snazi i
- dela za obradu ovih signala, tj. za izračunavanje impedanse ili kompleksnog koficijenta refleksije.

Merni blok može takođe da sadrži i dodatne sklopove, kao što su: sklop za merenje frekvencije, za kalibraciju, atenuaciju mernih signala, sintetizator i pojačavač RF učestanosti itd.

Upravljački blok

Upravljački blok je centralni deo uređaja za AAP i on realizuje algoritam rada AAP. Njegova namena je da obradi informaciju iz mernog bloka, pa da, na osnovu toga, generiše odgovarajuće upravljanje procesom podešavanja prilagodne mreže. Takođe je uloga upravljačkog bloka da vrši sinhronizaciju rada predajnika i AAP, kao i da prihvata i izvršava komande dobijene od eksterne upravljačke jedinice.

Upravljački blok se realizuje na bazi mikroprocesorskog upravljanja. Osnovni elementi upravljačkog bloka su:

- mikroprocesorski bazirana upravljačka jedinica (CPJ);
- sprega CPJ s prilagodnom mrežom;
- sprega CPJ s mernim blokom;
- sprega CPJ s pojačavačem snage;
- sprega CPJ s eksternom upravljačkom jedinicom.

Algoritam za podešavanje

Algoritam za podešavanje u uređaju za AAP predstavlja skup pravila na osnovu kojih je potrebno varirati vrednosti promenljivih elemenata u prilagodnoj mreži tako, da se vrednost impedanse antene (opterećenja) transformiše u oblast u ravni impedanse, koja zadovoljava nejednakost:

$$|\rho(Z_{ekv})| < \rho_{\max} \quad (9)$$

To je iterativan proces tokom koga se vrši naizmenično merenje ulazne impedanse prilagodne mreže opterećene impedansom antene Z_a i rekonfiguracija mreže u cilju zadovoljenja uslova (9).

Algoritam podešavanja mora da bude tako odabran da ekvivalentna impedansa:

- uvek konvergira i
 - konvergira u minimalnom broju iteracija.
- Algoritam podešavanja zavisi od strukture prilagodne mreže, a može da se definiše na sledeće načine:
- uzimanjem u obzir, ili ne, početnih uslova;
 - simultanom promenom više elemenata ili samo jednog elementa.

Važno je istaći, da postoji veza između stepena složenosti algoritma podešavanja i nivoa univerzalnosti AAP u smislu mogućnosti prilagođavanja većeg broja antena. Algoritam rada AAP bitno utiče na njegovo vreme podešavanja. Zato je izboru jednostavnog i efikasnog algoritma potrebno posvetiti posebnu pažnju.

Korišćenjem mogućnosti procesiranja informacija mikroprocesorski baziranog upravljačkog bloka, mogu da se uvedu dodatna poboljšanja procesa podešavanja u smislu pamćenja konfiguracije mreže na pojedinim frekvencijama, čime se problem svodi na prepoznavanje radne frekvencije predajnika i nalaženje odgovarajućih koeficijenata u memoriji upravljačkog modula. Ovakav način rada sa pretpodešavanjem omogućava da se antenska kutija adaptira na određeni tip antene u nekom opsegu frekvencije od interesa, ili na pojedinim frekvencijama u celom frekvencijskom opsegu tako, da se broj koraka u procesu podešavanja, a time i vreme podešavanja, svode na minimum. U ovom se slučaju radi o metodu podešavanja AAP u podopsezima.

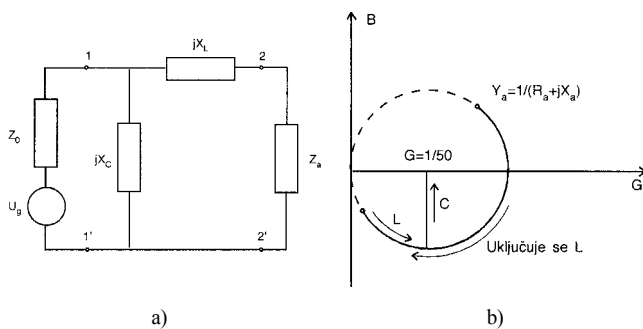
Najčešće korišćeni algoritmi za podešavanje su:

- algoritam za podešavanje u ravni kompleksnog koeficijenta refleksije,
- algoritam za podešavanje u R-X ravni i
- algoritam za podešavanje, u G-B ravni.

Algoritam za podešavanje u G - B ravni

S obzirom da programski paket za simulaciju AAP, koji je predmet razmatranja, uzima za osnovu simulaciju prilagođavanja 2.4-metarske štapa antene na nominalnu impedansu radio-uređaja (50Ω) u VF opsegu, prihvaćen je algoritam podešavanja u ravni admitanse (G - B ravni) kao najpogodniji za ovaj slučaj [11-13].

Rad algoritma se zasniva na informacijama dobijenim od detektora provodnosti (G) i faze (φ). Kao metoda za pretraživanje elemenata prilagodne mreže koristi se metoda sukcesivne aproksimacije. Ova metoda obezbeđuje minimalan broj koraka potreban da se izvrši proces prilagođavanja. Osnovna konfiguracija prilagodnog sistema data je na sl.6a.



Slika 6. a) Osnovna konfiguracija; b) Podešavanje u G - B ravni

Admitansa na ulazu u prilagodnu mrežu opterećenu impedansom antene, na mestu 1 - 1', data je izrazom:

$$Y_{ekv} = \frac{1}{(Z_a + jX_L)} + \frac{1}{jX_C} \quad (10)$$

odnosno,

$$Y_{ekv} = \frac{R_a}{R_a^2 + (X_a + X_L)^2} - j \left(\frac{X_a + X_L}{R_a^2 + (X_a + X_L)^2} + \frac{1}{X_C} \right) \quad (11)$$

$$G = \frac{R_a}{R_a^2 + (X_a + X_L)^2} \quad (12)$$

$$B = - \left(\frac{X_a + X_L}{R_a^2 + (X_a + X_L)^2} - \frac{1}{X_C} \right) \quad (13)$$

Uslov prilagođenja je:

$$G = \frac{1}{Z_0} \quad B = 0 \quad (14)$$

Izrazi (12 i 13), pokazuju da na provodnost utiče samo redna komponenta transformacionog četvoropola. Ova osobina nezavisnosti G u odnosu na X_C je iskorišćena u definisanju algoritma podešavanja.

Može se uzeti da uvek važi $\text{Re}(Z_a) < Z_0$ i $\text{Im}(Z_a) < 0$, što inače može uvek da se ostvari upotrebom transformacionih kondenzatora.

Postupak podešavanja ima sledeći tok (sl. 6b):

1. Uključuju se sve induktivnosti, osim najveće (kapaciteti su isključeni).
2. Ispituje se da li je poslednja induktivnost potrebna ili ne. Poslednja induktivnost nije potrebna, ako je zadovoljen sledeći sistem nejednačina: $G < \frac{1}{Z_0}$; $\varphi > 0$, inače je u narednom koraku treba ponovo uključiti.
3. Zavisno od rezultata ispitivanja u koraku 2, poslednja isključena induktivnost ostaje isključena ili se ponovo uključuje, a isključuje se prva sledeća induktivnost. Ako su ispitane sve induktivnosti, prelazi se na 4., inače se vraća na 2.

4. Postignut je uslov: $G = \frac{1}{Z_0}$, u granicama tačnosti

određene finoćom diskretizacije induktivnog niza. Uključuju se svi kapaciteti, osim najvećeg. Zbog invarijantnosti, G ostaje konstantno.

5. Ispituje se da li je poslednji uključeni kapacitet potreban ili ne. On nije potreban ako je zadovoljena nejednakost: $\varphi < 0$, inače ga u narednom koraku treba ponovo uključiti.

6. Zavisno od rezultata ispitivanja u 5. poslednji isključeni kapacitet ostaje isključen ili se ponovo uključuje, a isključuje se prvi sledeći kapacitet. Ako su ispitani svi kapaciteti, prelazi se na 7. u suprotnom se vraća na 5.

7. Kraj podešavanja. Zadovoljen je uslov podešavanja definisan pomoću (14) u granicama tačnosti određene finoćom diskretizacije induktivnog i kapacitivnog niza.

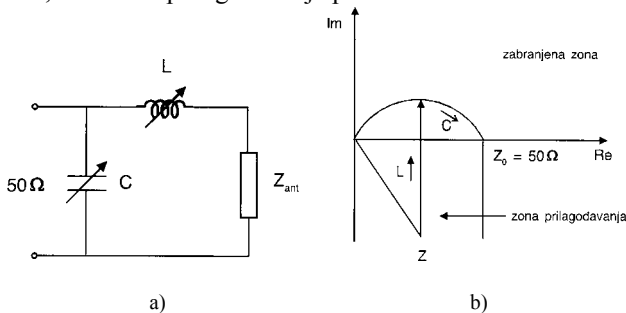
Izloženi algoritam, s datim načinom pretraživanja elemenata induktivnog i kapacitivnog niza, garantuje da će se proces podešavanja završiti u najviše $nL+1+nC+1$ koraka, gde su nL i nC broj članova induktivnog, odnosno kapacitivnog niza. Prednost ovog algoritma je i u tome što se pretraživanje elemenata induktivnog i kapacitivnog niza vrši odvojeno.

Simulacija automatskog antenskog prilagođenja

Osnovna šema za simulaciju

U fazi istraživanja tehničkih rešenja automatskog antenskog prilagođenja proučeno je više algoritama za podešavanje elemenata prilagodne mreže. Neki od algoritama su bili predmet istraživanja sa stanovišta pogodnosti za primenu u prilagođavanju 2.4-metarske štap antene.

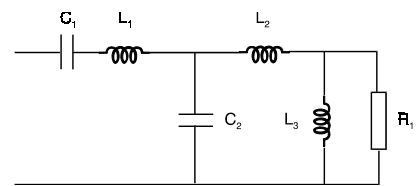
Za prilagodnu mrežu izabran je L tip mreže, prikazan na sl.7a, sa zonom prilagođavanja prikazanom na sl.7b.



Slika 7. a) Šema mreže za prilagođenje (L tipa); b) Zona prilagođavanja

Elementi prilagodne mreže odabrani su za prilagođavanje štap antene AT-27 (2 članka) dužine 2.4 metra. Impedansa štap antene AT-27 (2 članka) određena je merenjem. Da bi se omogućila simulacija prilagođenja antene i analiza algoritma antenskog prilagođenja u kontinuiranom frekvencijskom opsegu od 2 MHz do 30 MHz, potrebno je da se antena zameni ekvivalentnom mrežom. Ulazna impedansa ove mreže je data izrazom (15) i sl.8:

$$Z_{ul}(j\omega) = R_e(\omega) + jI_m(\omega) \quad (15)$$



Slika 8. Ekvivalentni model štap antene

Programski paket

Programski paket za simulaciju prilagođavanja impedanse antene na nominalnu impedansu radio-uređaja (50Ω) zamišljen je kao višekorisnički meni, koji omogućava korisnicima jednostavan pristup i rad sa softverskim paketima, koji se koriste prilikom ispitivanja antena [14]. Softver za komunikaciju sa korisnikom pisan je u Clipperu 5.01 [15], dok su sami programi za ispitivanje antena pisani na Microsoft Fortranu verzije 5.00. Program je modularnog tipa, što znači da su pojedine faze analize AAP-a implementirane u različitim programskim modulima (potprogrami tipa SUBROUTINE). Dijagram toka glavnog programa dat je na sl.9.

Glavni meni omogućava poziv četiri potprograma i sadrži opciju koja daje informacije o sistemu. Program može da obezbedi rad za više korisnika. Glavne opcije koje ovaj meni sadrži jesu:

- ALPOD** - potprogram za simulaciju algoritma podešavanja elemenata prilagodne mreže, kada se podešavanje izvodi u koordinatnom sistemu admitanse;
- SIOP** - potprogram koji računa širinu frekvencijskog pojasa oko radne frekvencije uz uslov da iznos $VSWR$ -a (Voltage Standing Wave Ratio) ne bude veći od zadatog (u tehničkoj upotrebi su ravnopravni termini K_{st} i $VSWR$);
- PROM-L-C** - potprogram za računanje maksimalno

dozvoljenih odstupanja L i C prilagodne mreže od nominalne vrednosti, a da se ne pređe zadati iznos $VSWR$ -a;

- DOPOD-L-C** - potprogram koji računa potrebne iznose dodatne induktivnosti i kapaciteta u slučaju frekvencijskog skakanja;
- SISTEM** - sistemski deo menija koji daje informacije o sistemu i sadži opcije koje omogućavaju višekorisnički rad.

Svaki od potprograma sadrži podmeni s tri opcije, koje mogu da se izvršavaju nezavisno. Podmeni sadrži sledeće opcije:

- Podaci** - opcija koja omogućava unos ulaznih podataka za ispitivanje antena u bazu ulaznih podataka i daje uvid u postojeće podatke iz ove baze;
- Obrada** - opcija koja poziva određeni fortranski program za ispitivanje antena, pri čemu se kao početni podaci za obradu uzimaju vrednosti iz poslednjeg zapisa ulazne baze, a rezultat obrade se upisuje na kraj baze izlaznih podataka, koji sadrži sve dosadašnje rezultate ispitivanja antena;
- Rezultati** - opcija koja omogućava ispis ulazne baze podataka na monitoru PC-a i štampaču, kao i ispis rezultata iz izlazne baze podataka za izabranu antenu.

Opcija **SISTEM**, koja daje informacije o sistemu, a nalazi se u glavnom meniju, sadrži sledeće opcije:

- Autor** - daje obaveštenje o autoru programa;
- Pregled** - daje pregled svih korisnika programa, pri čemu se samo iz sistemskog menija mogu videti svi korisnici programa i njihove šifre, dok ostali korisnici vide samo sebe;
- Lozinka Kreiranje** - omogućava promenu lozinke korisnika, omogućava kreiranje novog korisnika programa;
- Brisanje Pristup** - omogućava brisanje korisnika programa; definiše prioritet i pravo pristupa svakog korisnika;
- Help** - omogućava izmenu *help* sistema (uputstva).

Opis opcije ALPOD

Opcija **ALPOD** omogućava simulaciju algoritma za prilagođenje impedansu štap antene na karakterističnu impedansu predajnika.

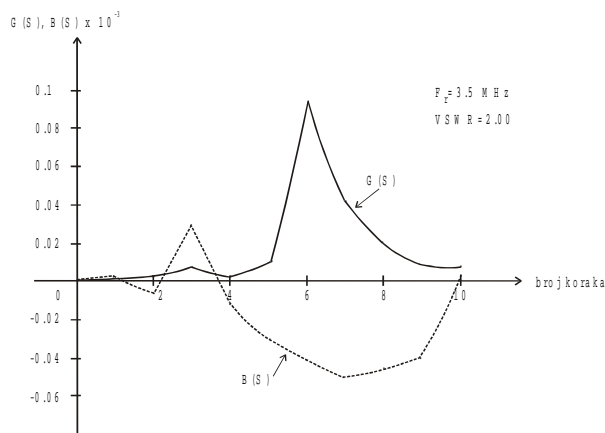
Tabela 1. Rezultat podešavanja

Korak	G (S)	B (S)	L (μ H)	C (pF)	$VSWR$
0	0.000002783	0.0008858	0.0000	0.000	7204.1
1	0.000126032	0.0039827	39.9300	0.000	165.0
2	0.000283005	-0.0052762	59.9300	0.000	75.6
3	0.008706281	0.0297922	49.9300	0.000	7.7
4	0.001512685	-0.0124698	54.9300	0.000	18.4
5	0.013997750	-0.0361556	52.4300	0.000	6.6
6	0.095588520	0.0357979	51.1800	0.000	5.5
7	0.048216530	-0.0537722	51.8050	0.000	5.6
8	0.023743920	-0.0446661	52.1300	0.000	6.1
9	0.017974790	-0.0401320	52.2800	0.000	6.3
10	0.017974790	0.0044309	52.2800	2026.400	1.3

Kao rezultat ovog potprograma dobijena je tabela u kojoj su za svaki korak podešavanja date vrednosti za G i B u (S) (pošto algoritam za prilagođenje radi u koordinatnom sistemu admitanse), vrednosti L (μ H) i C (pF), te iznos $VSWR$ -a. U tabeli 1 su prikazani rezultati podešavanja za

antenu dužine 2.4 m, $VSWR=2$, $Imp=50 \Omega$ i $F_r=3.5$ MHz.

Na ovaj je način moguće steći kompletniji uvid u proces prilagođenja u svakom njegovom koraku. Rezultati iz tabele su pogodni za dalju grafičku obradu. Na osnovu njih je moguće nacrtati dijagram promene G i B u funkciji broja koraka za zadati $VSWR$ (sl.10).



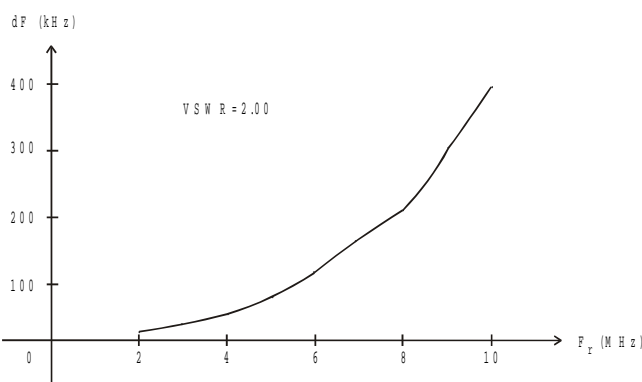
Slika 10. Dijagram promene G i B u funkciji broja koraka za zadati $VSWR$

Opis opcije SIOP

Opcija **SIOP** omogućava da se unutar zadatog opsega frekvencija (koji mora da bude podopseg intervala 2 - 30 MHz), za pojedine radne frekvencije određene veličinom koraka promene frekvencije, izračuna dozvoljeno odstupanje frekvencije u oba smera, ako se kao indikator maksimalno dozvoljenog odstupanja koristi unapred zadati iznos $VSWR$ faktora.

Tabela 2. Rezultat ispitivanja frekvencijske širine

F_r (MHz)	F_d (kHz)	F_g (kHz)	dF (kHz)
2.000	7.000	10.000	17.000
3.000	16.000	16.000	32.000
4.000	28.000	27.000	55.000
5.000	40.000	47.500	87.500
6.000	52.500	75.000	127.500
7.000	67.500	105.000	172.500
8.000	110.000	120.000	230.000
9.000	125.000	180.000	305.000
10.000	130.000	260.000	390.000



Slika 11. Zavisnost frekvencijske širine od radne frekvencije za zadati $VSWR$

Kao rezultat ovog potprograma dobijena je tabela u kojoj se za svaku radnu frekvenciju daje frekvencijska širina na gore, frekvencijska širina na dole i ukupna frekvencijska širina na kojoj se zadržava zadati $VSWR$. U tabeli 2 su

prikazani rezultati ispitivanja frekvencijske širine za zadati $VSWR=2$ i promenu radne frekvencije od 2 MHz do 10 MHz.

Rezultati ispitivanja frekvencijske širine su pogodni za dalja ispitivanja. Na osnovu njih može da se nacrtati dijagram promene frekvencijske širine u funkciji radne frekvencije za zadati $VSWR$ (sl.11).

Ovaj potprogram je značajan jer omogućava sagledavanje situacije: koliko može da bude neprecizna radna frekvencija, a da unutar tog odstupanja ne dođe do promene prilagodne mreže, jer ostaje zadovoljen kriterijum za $VSWR$.

Opis opcije **PROM-L-C**

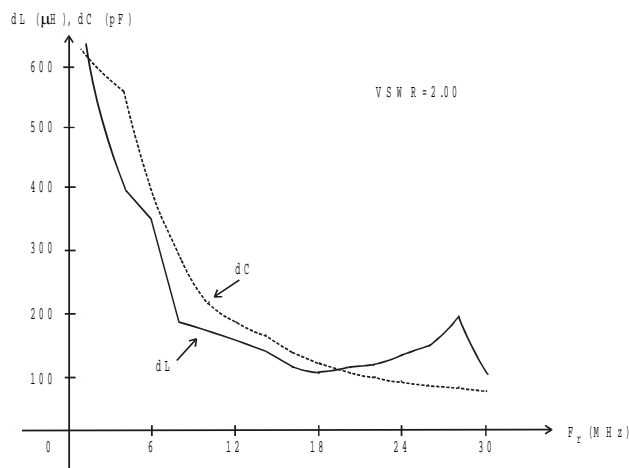
Opcija **PROM-L-C** veoma je slična opciji **SIOP**. Razlika je u tome što umesto frekvencija ovde variraju vrednosti elemenata prilagodne mreže s namerom da se na pojedinim radnim frekvencijama utvrdi dozvoljeno odstupanje induktivnosti, odnosno kapacitivnosti. Kao stop kriterijum ponovo se uzima neki unapred zadati iznos $VSWR$ faktora.

Osnovna funkcija ovog potprograma jeste odgovor na pitanje, kojom finoćom treba da se realizuje diskretni induktivni odnosno kapacitivni niz, tj. da se odredi poslednji element niza.

Rezultat ovog potprograma je tabela u kojoj je za svaku radnu frekvenciju dato dozvoljeno odstupanje induktivnosti, dL (μH), i kapacitivnosti, dC (pF), za unapred zadatu vrednost $VSWR$ -a. U tabeli 3 su data dozvoljena odstupanja induktivnosti dL (μH) i kapacitivnosti dC (pF) za radne frekvencije od 2 MHz do 30 MHz i za zadati $VSWR=2.00$.

Tabela 3. Dozvoljena odstupanja induktivnosti dL (μH) i kapacitivnosti dC (pF)

F_r (MHz)	dL (μH)	dC (pF)
2.000	1607.114	1135.630
4.000	398.817	569.018
6.000	349.544	384.592
8.000	192.364	287.782
10.000	178.999	229.716
12.000	158.896	190.281
14.000	138.057	164.366
16.000	118.014	142.690
18.000	113.125	125.731
20.000	121.101	112.802
22.000	125.576	103.678
24.000	137.544	94.057
26.000	158.557	87.052
28.000	198.125	80.534
30.000	107.521	75.063



Slika 12. Zavisnost dozvoljenog odstupanja induktivnosti i kapacitivnosti od radne frekvencije za zadati $VSWR$

Prikazani rezultati u tabeli 3 su pogodni za dalju grafičku obradu. Na osnovu njih se može nacrtati dijagram zavisnosti dozvoljenog odstupanja induktivnosti i kapacitivnosti u funkciji radne frekvencije, a za zadati $VSWR$ (sl.12).

Opis opcije **DOPOD-L-C**

Opcija **DOPOD-L-C** treba da da odgovore na neka pitanja koja su vezana za rad u modu frekvencijskog skakanja. Problem je postavljen na sledeći način: ako se na nekoj radnoj frekvenciji prethodno izvrši podešavanje na najmanji mogući iznos $VSWR$ -a za tu frekvenciju (radi se o diskretnim nizovima L -a i C -a), te se posle toga izvrši skakanje maksimalnim skokom, koliki su dodatni iznosi L -a i C -a potrebni da se mreža ponovo prilagodi na najbolji mogući $VSWR$. Pri tome se takođe unapred zada neki iznos $VSWR$ -a koji služi kao kriterijum za dopodešavanje. Iznos maksimalnog frekvencijskog opsega skakanja je određen sledećim pravilom:

$$df = 10\% \text{ od } f_{\text{radno}}, \text{ ako je } f_{\text{radno}} < 20 \text{ MHz};$$

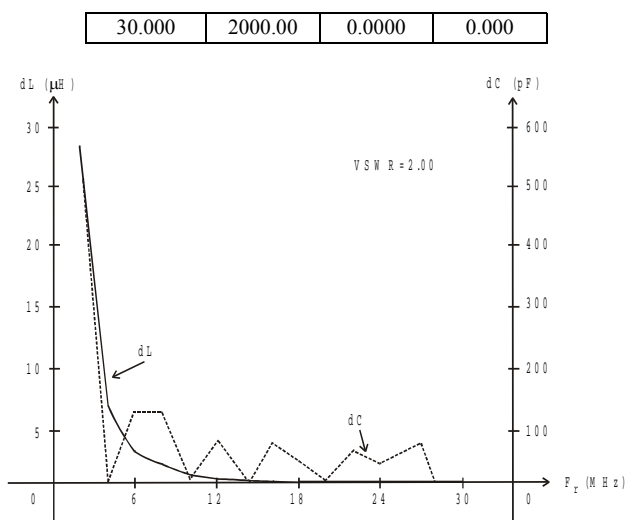
$$df = 2 \text{ MHz}, \text{ ako je } f_{\text{radno}} > 20 \text{ MHz}.$$

Rezultat ovog potprograma je tabela u kojoj su za svaku radnu frekvenciju dati frekvencijski opseg skakanja, potrebni dL (μH) i dC (pF) za dopodešavanje, a za unapred zadatu vrednost $VSWR$ -a.

U tabeli 4 su dati potrebni dL (μH) i dC (pF) za dopodešavanje za radne frekvencije od 2 MHz do 30 MHz, uz odgovarajući frekvencijski opseg skakanja i za zadati $VSWR=2.00$.

Tabela 4. Potrebni dL (μH) i dC (pF) za dopodešavanje

F_r (MHz)	F_s (MHz)	dL (μH)	dC (pF)
2.000	200.00	27.9450	510.00
4.000	400.00	7.0250	0.000
6.000	600.00	3.0950	127.000
8.000	800.00	1.7550	127.000
10.000	1000.00	1.1750	13.600
12.000	1200.00	0.7750	81.600
14.000	1400.00	0.6250	12.400
16.000	1600.00	0.4000	82.600
18.000	1800.00	0.3550	33.000
20.000	2000.00	0.3300	0.000
22.000	2000.00	0.2500	63.600
24.000	2000.00	0.2250	33.000
26.000	2000.00	0.0000	81.400
28.000	2000.00	0.0000	0.000



Slika 13. Zavisnost dL i dC od radne frekvencije, a za zadati $VSWR$

Prikazani rezultati u tabeli 4 su pogodni za dalju grafičku obradu. Na osnovu njih može da se nacrtati dijagram zavisnosti dL i dC u funkciji radne frekvencije za dozvoljeni $VSWR$ (sl.13).

Zaključak

Razvijeni program za simulaciju uređaja koji vrši prilagođavanje impedanse VF antene na otpornost od 50Ω je modularnog tipa, što znači da su pojedine faze podešavanja elemenata automatskog antenskog prilagođenja (AAP) implementirane u različitim programskim modulima. Program je koristan za istraživanje tehničkih rešenja AAP zato što omogućava:

- simulaciju algoritma za prilagođenje impedanse štap antene na karakterističnu impedansu predajnika, tako što nam kao rezultat daje broj koraka, vrednosti induktivnosti i kapacitivnosti potrebne za prilagođenje pri zadatom kriterijumu za $VSWR$;
 - da utvrdimo kako na ceo sistem AAP utiče variranje frekvencije, odnosno variranje vrednosti elemenata prilagodne mreže, pri zadatom kriterijumu za $VSWR$;
 - simulaciju rada AAP u režimu frekvencijskog skakanja pri zadatom kriterijumu za $VSWR$ (koji služi kao kriterijum za dopodešavanje).
- Softver za komunikaciju s korisnikom je univerzalan i na

ovaj način može da se prikaže bilo koja druga aplikacija. Iz menija je moguće pozvati programe pisane na različitim programskim jezicima, uz neznatne izmene.

Takođe, ovaj program za simulaciju je otvoren za dalju doradu, odnosno da se obezbedi da program simulira rad AAP za druge štap antene (ovde je analizirana 2.4 m štap antena).

Literatura

- [1] ŠUNJEVARIĆ, M.M. *Radiotehnika, prvi i drugi deo*. Vojnotehnička akademija, Beograd, 2000.
- [2] MILEUSNIĆ, M., TODOROVIĆ, J., PETROVIĆ, P. *Analiza mogućnosti realizacije brzih antenskih kutija u savremenim KT radio-sis-temima*. XXX konferencija ETAN-a u pomorstvu, Zadar, SFRJ, 1988, p.81-86.
- [3] ...*Prilagođenje antensko automatsko za KT opseg, snage 1 kW*. Elaborat o istraživanju, IRITEL, VTI-05-37-573, Beograd, 1988.
- [4] ABRIE, P.L.D. *The Design of Impedance-Matching Network for Radio-Frequency and Microwave Amplifiers*. Artech House, Inc., 1985.
- [5] CONTICELLO, C. A Breakthrough in Mobile HF Communication: A New Generation of High Power Automatic Antenna Couplers. *Signal*, 1984, March, p.71-76.
- [6] CONTICELLO, C., GENTILI, V. A New Generation of High-Power Automatic Antenna Coupler for HF Communications. *Teltra Review*, 1983 October, no.35.
- [7] ...*RAT 100 Automatic Antenna Tuner*. Trans World Communications, Inc., Operator's Manual, 1991.
- [8] MALJKOVIĆ, M.R. *Automatska antenska prilagođenja za VF opseg*. int. dok. VTI, Beograd, Podaci o naoružanju br.102, 1989.
- [9] CUTHBERT, T.R. *Circuit Design Using Personal Computers*. John Wiley & Sons, 1983.
- [10] YENGST, W.C. *Procedures of Modern Network Synthesis*. The Macmillan Company, New York, 1964.
- [11] ...*Elaborat o istraživanju tehničkih rešenja prilagođenja antenskih automatskih za VF opseg*. int. dok. VTI-005-37-584, Beograd, 1989.
- [12] ...*Izveštaj o ispitivanju maketa prilagođenja antenskih automatskih za VF opseg*. int. dok. VTI-005-03-01621990, Beograd, 1990.
- [13] ...*Prilagođenje antensko automatsko, snage 30 W i 100 W*. Tehnički izveštaj o ispitivanju maketa, int. dok. VTI-005-01-0361, Beograd, 1990.
- [14] MALJKOVIĆ, M.R., SAJNKAR-VELEVIĆ, L.M. *Program za simulaciju prilagođenja antena na 50 oma u VF opsegu*. int dok. VTI-005-01-0490, VTI VJ Beograd, 1994.
- [15] STRALEY, S.J. *Programiranje na Clipper-u*. Prevod drugog izdanja, Mikro knjiga, Beograd, 1990.-

Rad primljen: 2.4.2001.god.

