

## ANALIZA POGREŠKE ANALOGNIH MREŽA METODOM FORMIRANJA TABLICE POGREŠAKA

Dražen Jurišić, Vladimir Čosić, Neven Mijat  
Elektrotehnički fakultet Zagreb

### Sažetak

*U radu je opisan postupak otkrivanja pogrešaka kod analognih mreža. Postupak spada u pristup analiza-prije-testiranja. Analiza za nazivni slučaj i simulacija pogrešaka izvode se na električkom računaru. Nakon analize postupak formira tablicu pogrešaka u frekvencijskoj domeni. Prilikom konstruiranja tablice pogrešaka, razmatra se način ocjenjivanja pogrešaka, a odabirom optimalnog skupa mjerenja eliminiraju se suvišne test frekvencije. Na primjeru konkretnog analognog sklopa provedena je takva analiza. Opisana je oprema za testiranje koja se sastoji od računala i računalom upravljano analizatora mreža. Dana je i klasifikacija metoda analize pogreške analognih mreža prema raznim kriterijima.*

## FAULT ANALYSIS OF ANALOG NETWORKS USING FAULT DICTIONARY

### Abstract

*This paper presents Fault Location Technique in Analog Networks. The technique belongs to the simulation-before-test approach. Nominal case and fault simulations are performed using computer. This produces fault dictionary in frequency domain. Under fault dictionary construction the way how faults are to be marked is considered, and under optimal set of measurements selection redundant test frequencies are eliminated. In the example real analog circuit is analyzed. Testing equipment that consists of computer and computer controlled network analyzer is also described. The fault analysis of analog networks classification according to different criteria is considered.*

### 1. UVOD

Pogreškom ili kvarom se općenito smatra bilo koja promjena vrijednosti elementa u odnosu na njegovu nazivnu vrijednost koja može prouzročiti kvar cijelog kruga.

Prilikom projektiranja i serijske proizvodnje analognih uređaja, kao što su razni električki filtri, pojačala i sl. neophodno je na kraju procesa proizvodnje izvršiti testiranje proizvoda. Traži se moguća pogreška u uređaju mjerenjem na opremi za testiranje. Oprema za testiranje se sastoji od digitalnog analizatora mreža koji je preko IEEE-488 (HPIB) busa povezan s računalom te odgovarajućeg softvera kao što to prikazuje slika 1.

Za zadani uređaj unosi se njegova električka shema s nazivnim vrijednostima elemenata u električko računalo. Najprije se vrši frekvencijska analiza mreže s nazivnim vrijednostima pomoću programa za analizu kao npr. SPICE ili FILCAD.

Zatim program prema određenom algoritmu simulira pogreške te vrši frekvencijsku analizu mreže s pogreškom. Frekvencijska analiza se može vršiti u velikom broju frekvencija (test točkama) ili u reduciranom broju frekvencija. Izlazni nivoi na tim frekvencijama su analogne vrijednosti. Te analogne vrijednosti možemo kvantizirati i spremirati u obliku tablice.

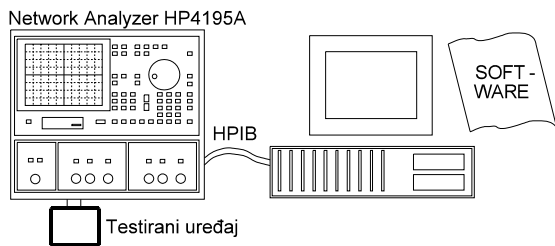
Postupak spada u pristup analiza-prije-testiranja. Stoga, kada je analiza gotova, ispitivani uređaj se priključi na opremu za testiranje. Analizator mreža vrši testiranje prema tablici pogrešaka u računaru generiranoj tokom prethodne simulacije. Program utvrđuje koji je element eventualno neispravan te ga se može zamijeniti. Isti postupak se može primjenjivati i u servisne svrhe, a ne samo kao završno testiranje tokom proizvodnog procesa.

Prilikom analiziranja pogrešaka kod analognih uređaja postoje poteškoće zbog nelinearne prirode problema. Ako pojedini parametar promijeni



vrijednost za određeni faktor, odzivi se neće promijeniti za isti faktor tj. odnos između odziva kruga i karakteristike komponenata je nelinearan iako krug može biti linearan. Prisutan je i nedostatak dobrih modela za simulaciju pogreške.

Testiranje digitalnih uređaja je puno jednostavnije jer je lakše usporediti izlazne nivoe iz testirane ploče s nivoima spremljenim u tablici pogrešaka u sklopu opreme za testiranje. Ti nivoi nisu analogne vrijednosti, niti kvantizirane analogne vrijednosti kao kod analognih mreža nego su dani u obliku logičkih stanja "0" i "1". Nema poteškoća zbog nelinearnosti, a postoje i dobri modeli za simulaciju pogrešaka.



Sl. 1. Oprema za testiranje

## 2. ANALIZA POGREŠKE KOD ANALOGNIH MREŽA

### 2.1. Klasifikacija metoda analiza pogreške kod analognih mreža

Razlikujemo tri glavna problema koji se pojavljuju prilikom testiranja mreža

- otkrivanje pogreške
- pronalaženje mjesta (lokacija) pogreške
- identifikacija pogreške

Otkrivanje kvara je očigledno preduvjet za kasnije pronalaženje mjesta pogreške i njeno identificiranje. Stoga pretpostavljamo da je kvar već otkriven.

Postoji još i problem *predviđanja* pogreške koji se sastoji u stalnom praćenju odziva mreže kako bi se identificiralo da li će se bilo koji element mreže pokvariti. Osnovna zadaća je da se takav element zamijeni prije no što se kvar dogodi. Problematikom predviđanja pogreške se takođe nećemo baviti u ovom radu.

Pogreške mogu biti

- katastrofalne ili tvrde
- devijacijske ili meke.

Tvrde pogreške nastaju kada pokvareni element proizvede kratki spoj ili prazni hod, a meke pogreške kada vrijednost elementa odstupa od nazivne vrijednosti, a ne dosegne svoje maksimalne granice. Meke pogreške mogu nastupiti uslijed tolerancija, starenja ili parazitskih efekata.

U uređaju se može dogoditi samo jedna pogreška tj. jedan element mreže može biti pokvaren ili se može više elemenata pokvariti odjednom. U prvom slučaju govorimo o

*pojedinačnoj* pogreški, a u drugom o *višestrukim* pogreškama. Većina tehnika otkrivanja pogrešaka je razvijena za slučaj kad je samo jedan element pokvaren, dok je višestruke pogreške vrlo teško analizirati. U ovom radu će se proučavati tehnika otkrivanja pojedinačnih pogrešaka.

Postoji kategorizacija u skladu s korakom u kojem se događa simulacija testiranog kruga

- analiza-prije-testiranja
- analiza -poslije-testiranja

Moguća je i kategorizacija prema domeni analize

- pristup u DC domeni
- pristup u frekvencijskoj domeni
- pristup u vremenskoj domeni

Metoda opisana u ovom radu spada u pristup analiza-prije-testiranja, a analizu provodimo u frekvencijskoj domeni.

### 2.2. Pristup u frekvencijskoj domeni formiranjem tablice pogrešaka

Postupci u frekvencijskoj domeni se koriste sinusoidalnom pobudom mreža i imaju prednost da je teorija koja se koristi razumljiva većini inženjera koji provode testiranja. Iako je za testiranje dovoljan jednostavan hardver (npr. sinusoidalni generator, voltmetar i spektralni analizator), mi ćemo se koristiti kompjuterski upravljanim digitalnim analizatorom mreža.

Prvi korak u konstrukciji tablice pogrešaka u frekvencijskoj domeni je definicija pogreške. To je vrlo važan korak jer će kasnije biti moguće identificirati jedino te pogreške. Mora se uključiti veliki broj potencijalnih pogrešaka, a pri tom se treba paziti da dobivena tablica ne bude prevelika.

Drugi korak je odabrati skup početnih test frekvencija. To se može na više načina.

Zatim se testirani krug simulira za te pretpostavljene loše slučajeve kako bi se razvio skup pobuda i odziva koji će otkriti i izolirati pogreške. Odzivi se bilježe i nalaze se spremljeni u tablici. Potreban je optimalni izbor poticaja, odziva i zabilješki kako bi se spremila minimalna količina podataka koja doseže željeni stupanj izolacije. Stoga se suvišni podaci izbacuju iz tablice. Treba posebno naglasiti da svaki suvišni podatak jako poskupljuje cijeli postupak otkrivanja pogrešaka u smislu kompjuterskog vremena i memorije.

U trenutku testiranja mjereni se uređaj pobuđuje istom pobudom koja se upotrebljavala tokom formiranja tablice. Zabilješke koje se dobiju uspoređuju se s onima spremljenim u tablici. Prema jednoj od unaprijed spremljenih pogrešaka ili prema skupu pogrešaka koje daju isti efekt (skup dvosmislenosti) utvrdi se da je uređaj pokvaren i identificira se element ili skup elemenata s pogreškom.

Treba razlikovati skup elemenata (skup dvosmislenosti) od kojih svaki sam za sebe izaziva

istu pojedinačnu pogrešku od skupa više pokvarenih elemenata koji u isto vrijeme izazivaju višestruku pogrešku.

### 2.3. Primjer

Za analogni električni krug na slici 2. simulirat ćemo pogreške tako da vrijednosti svih pasivnih elemenata mreže variramo  $\pm 50\%$ . Tako ćemo imati definirane slijedeće pogreške:

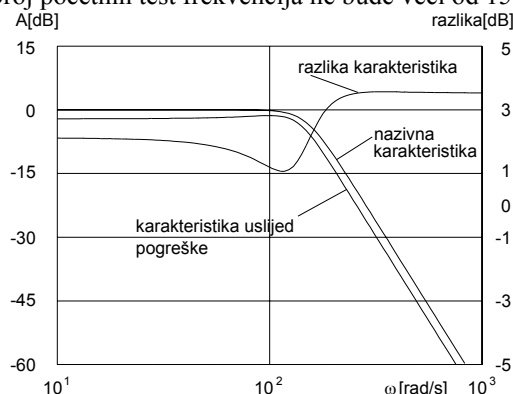
$R_{1+}$  (otpor  $R_1$  se povećao za 50%),  $R_{1-}$  (otpor  $R_1$  se smanjio za 50%),  $R_{2+}$ ,  $R_{2-}$ ,  $R_{3+}$ ,  $R_{3-}$ , ...,  $C_{1+}$ ,  $C_{1-}$ , ...,  $C_{4+}$ ,  $C_{4-}$ . To ukupno čini skup od 28 pogrešaka. Pri tom očekujemo da će kratki spoj nekog elementa analogne mreže prouzrokovati pogrešku sličnu variranoj vrijednosti parametra te mreže za -50%, dok će prazni hod (prekid spojne žice elementa) prouzrokovati pogrešku sličnu variranoj vrijednosti parametra tog elementa za +50%.

Amplitudno-frekvencijsku analizu kruga provodimo pomoću programa FILCAD u frekvencijskom opsegu od  $10^1$ - $10^3$  rad/s u 100 točaka. Sve vrijednosti su dane u dB. Kako će se manifestirati varijacija parametra pojedinog elementa mreže vidljivo je na slikama 3a i 3b za element  $R_1$  ( $\pm 50\%$ ). Osim nazivne karakteristike i karakteristike uslijed pogreške dana je i razlika tih dviju karakteristika. Vidljivo je da razlika može katkad imati pozitivne, a katkad negativne vrijednosti. U nekim slučajevima pogrešaka razlike imaju ekstreme na pojedinim frekvencijama. Proučavanjem karakteristika koje dobijemo varijacijom ostalih elemenata moguće je zaključiti da će biti više različitih frekvencija na kojima se ti ekstremi pojavljuju. Takođe, neće u svim tim slučajevima razlika imati ekstrem.

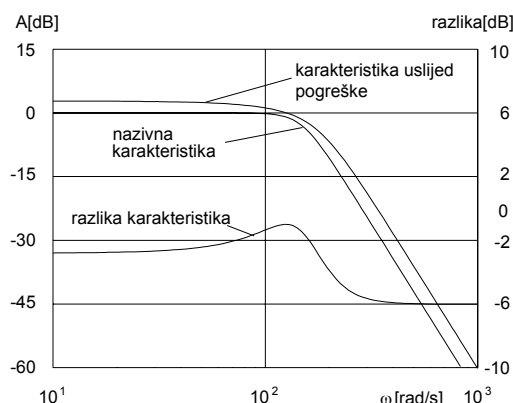
Početni skup test frekvencija se može odabrati na više raznih načina. Seshu i Waxmann [1] su odabrali test frekvencije na slijedeći način. Neka racionalna prijenosna funkcija  $H(s)$  ima nule i polove  $z_i$  i  $p_j$ , a kružne frekvencije  $\omega_i$  i  $\omega_j$  neka su amplitude od  $z_i$  i  $p_j$ . Ove se frekvencije zovu prekidne frekvencije ili točke prekida. Test frekvencije se zatim odaberu tako da se barem jedna nalazi ispod najniže ne-nula prekidne frekvencije, jedna iznad najviše konačne prekidne frekvencije i po jedna između uzastopnih prekidnih frekvencija. Ovaj izbor je logičan jer su

sve nule i polovi mreže funkcije u parametrima mreže pa devijacije tih parametara urokuju promjene u lokacijama nula i polova i shodno tome, promjenu amplitude transfer funkcije.

U našem primjeru kao početni skup test frekvencija za formiranje tablice pogrešaka odaberemo podskup frekvencija na kojima se pojavljuju ekstremi razlika nazivne karakteristike i karakteristike s greškom. Možemo ih označiti rednim brojem od 0-100. To će biti slijedeće frekvencije, redni brojevi 47, 50, 52, 53, 54, 57, 58, 60, 62, 66, 67, 71 (ukupno 12 frekvencija). Dobro bi bilo da broj početnih test frekvencija ne bude veći od 15.

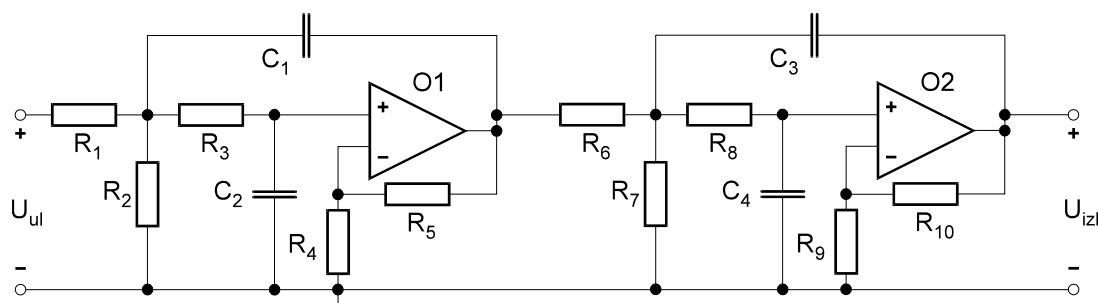


Sl. 3a Promjena vrijednosti  $R_1$  +50%



Sl. 3b Promjena vrijednosti  $R_1$  -50%

Za svaku situaciju od 28 kvarova treba izračunati pojačanje i zabilježiti ga na svakoj od 12 test frekvencija. Zapis pojačanja dobije se kvantiziranjem devijacije pojačanja od nazivnog (odn. razlike). Tako npr. devijacija unutar 0.5dB odgovara zapisu "0", devijacija od 0.5 do 2dB veća od nazivnog pojačanja odgovara zapisu "1" itd.



Sl. 2. Butterworthov NP filter četvrtog reda s  $\omega_0=148,78$  rad/s realiziran kaskadom dviju sekcija drugog reda

Kodovi prema kojima se ocjenjuje devijacija pojačanja se nalaze u tablici 1.

Tablica pogrešaka koja upotrebljava test frekvencije iz početnog skupa za  $\pm 50\%$  devijacije u elementima mreže prikazana je tablicom 2. Treba primjetiti da prvi stupac koda odgovara amplitudnom odzivu na test frekvenciji 47. Slično, ostali stupci odgovaraju odzivima na ostalim test frekvencijama.

Kod	Objašnjenje
0	unutar 0.5dB od nazivnog pojačanja
1	0.5 do 2dB više nego nazivno pojačanje
2	2 do 4dB više nego nazivno pojačanje
3	4 do 7dB više nego nazivno pojačanje
4	više od 7dB više nego nazivno pojačanje
5	0.5 do 2dB manje nego nazivno pojačanje
6	2 do 4dB manje nego nazivno pojačanje
7	4 do 7dB manje nego nazivno pojačanje
8	više od 7dB manje nego nazivno pojačanje

**Tablica 1.** Kodovi za kvantiziranje devijacije amplitudnog odziva od nazivnog

Kod zapisa	Greška	Kod zapisa	Greška
111111122222	$R_{1+}$	555555566777	$R_{1-}$
666666555000	$R_{2+}$	333333322111	$R_{2-}$
112223333333	$R_{3+}$	100005678888	$R_{3-}$
233333333222	$R_{4+}$	777778887777	$R_{4-}$
677888888776	$R_{5+}$	333444443333	$R_{5-}$
111112222222	$R_{6+}$	555556666667	$R_{6-}$
000000000000	$R_{7+}$	111111110000	$R_{7-}$
111112222222	$R_{8+}$	555556666667	$R_{8-}$
111111111111	$R_{9+}$	555555555555	$R_{9-}$
555555555555	$R_{10+}$	111111111111	$R_{10-}$
788887601222	$C_{1+}$	23333333210	$C_{1-}$
233334444333	$C_{2+}$	000005678888	$C_{2-}$
555550001111	$C_{3+}$	11111100005	$C_{3-}$
222222233333	$C_{4+}$	666677778888	$C_{4-}$

**Tablica 2.** Kodovi zapisa za specifične slučajeve pogreške (tablica pogrešaka)

Također treba primjetiti da parovi pogrešaka  $R_{6+}$  i  $R_{8+}$ ,  $R_{6-}$  i  $R_{8-}$ ,  $R_{9+}$  i  $R_{10-}$  kao i  $R_{9-}$  i  $R_{10+}$  imaju isti kod. Kao takvi formiraju skupove dvosmislenosti. Ostali slučajevi pogreške su jedinstveno identificirani.

Cilj optimalnog izbora mjerenja je smanjiti broj mjerenja bez utjecaja na mogućnost dijagnoze. To vodi eliminaciji viška mjerenja i smanjenju dimenzija tablice pogrešaka. U našem primjeru je vidljivo da bismo neke stupce koda mogli izbaciti (tj. eliminirati neke test frekvencije), a da se kodovi međusobno još uvijek razlikuju u istoj mjeri kao i ranije. Pri tom bi bilo dobro razdvojiti jedinstveno izolirane slučajeve pogreške (tablica 3a) od dvosmislenih skupova (tablica 3b). Algoritam eliminacije viška podataka u tablici je postupak binarne logičke manipulacije [2]. Najmanji broj potrebnih test frekvencija je četiri. Postoji sedam-

naest kombinacija po četiri test frekvencije od kojih odabiremo jednu kombinaciju pa reducirani skup test frekvencija čine redni brojevi frekvencija 47, 53, 57 i 71.

Kod zapisa	Greška	Kod zapisa	Greška
1112	$R_{1+}$	5557	$R_{1-}$
6660	$R_{2+}$	3331	$R_{2-}$
1233	$R_{3+}$	1058	$R_{3-}$
2332	$R_{4+}$	7787	$R_{4-}$
6886	$R_{5+}$	3443	$R_{5-}$
0000	$R_{7+}$	1110	$R_{7-}$
7872	$C_{1+}$	2330	$C_{1-}$
2343	$C_{2+}$	0058	$C_{2-}$
5501	$C_{3+}$	1115	$C_{3-}$
2223	$C_{4+}$	6678	$C_{4-}$

**Tablica 3a.** Kodovi zapisa za jedinstveno izolirane pogreške na reduciranom skupu test frekvencija

Kod zapisa	Par grešaka	
1122	$R_{6+}$	$R_{8+}$
5567	$R_{6-}$	$R_{8-}$
1111	$R_{9+}$	$R_{10-}$
5555	$R_{9-}$	$R_{10+}$

**Tablica 3b.** Kodovi zapisa za nejedinstveno izolirane pogreške na reduciranom skupu test frekv.

Odzivi izmjereni na analizatoru mreža se kodiraju na sličan način i provodi se šablonsko uspoređivanje kako bi se identificirala pogreška koja proizvodi isti kod kao onaj od izmjenjenog odziva. Ukoliko se otkrije da kod u isto vrijeme identificira dvije ili više pogrešaka, tada se moraju zamijeniti svi pokvareni elementi.

### 3. ZAKLJUČAK

Kao što se vidi iz primjera moguće je otkriti eventualan kvar u analognoj mreži. Međutim, dobivena tablica pogrešaka nije optimalna. Ako bi se odabrale neke druge početne test frekvencije i definirala tablica s drugim kodovima zapisa devijacija, možda bi se dobila tablica pogrešaka s manjim brojem test frekvencija i sa svim pogreškama jedinstveno izoliranim. Ova problematika ostaje predmetom daljnjeg istraživanja.

### 4. LITERATURA

- [1] S. Seshu, R. Waxmann; Fault isolation in conventional linear systems-A feasibility Study, IEEE, Trans. Reliab. vol. R-15, (29-34), 1966.
- [2] W. Hochwald, J. D. Basian; A dc approach for analog fault dictionary determination, IEEE, Trans. on Circuits and Systems, vol CAS-26, (523-529), 1979.
- [3] J. W. Bandler, A. E. Salama; Fault diagnosis of analog circuits, IEEE, Proceedings, vol. 73, (1279-1325), Kolovoz, 1985.