

VEŠTAČKA  
TEHNIKA

YU ISSN 0015-1144  
STRAŽI (1-2), 1-2 (1980)  
Mesto: Zagreb, 461.2/3 + 62 + 47/03  
= 861/61

Uredništvo: Institut za automatizaciju i informaciju  
BEOGRAD, ul. Vojvode Stevana 27, 11000 Beograd  
Izdavač: Institut za automatizaciju i informaciju, Beograd  
Prvi broj izlazi u aprilu 1980. Broj 10 izlazi u oktobru 1980.

# automatika

1-2/1980

GODINA  
21

## Časopis izdaje Jugoslavenski savez za ETAN

Časopis izlazi tri do šest puta godišnje

### SUDJELUJU U SUFINANCIRANJU

Samoupravna interesna zajednica za znanstveni rad SRH, Zagreb  
Savez republičkih i pokrajinskih samoupravnih interesnih zajednica za naučne djelatnosti u SFRJ.  
Raziskovalna skupnost Slovenije, Ljubljana

### OSNIVAČI

Energoinvest, poduzeće za projektovanje i izgradnju energetske i industrijskih postrojenja, Sarajevo — Združeno podjeje Iskra-Kranj — Jugoslavenski savez za elektroniku, telekomunikacije, automatiku i nuklearnu tehniku (ETAN), Beograd — ATM Poduzeće za automatiku i tehniku mjerenja u industriji Zagreb — Elektrotehnički institut poduzeća »Rade Končar«, Zagreb — Fabrika »Teleoptik« Zemun — Zavod za avtomatizaciju, Ljubljana — Unimatik, poslovno udruženje za avtomatizaciju, Beograd

### IZDAVAČKI SAVJET

Predsjednik: Ivo Bautović, Republički sekretarijat za energiku, industriju i znanstvo, Zagreb; prof. dr. Petar Crnošija, Elektrotehnički fakultet Zagreb (predstavnik SIZ-a za znanstveni rad SRH); prof. Jože Černelc, Elektrotehnički fakultet Zagreb; prof. dr. Božidar Frančić, SOUR »R. Končar«, Zagreb; Ivica Gretić, Republički odbor SUBNOR SRH, Zagreb; prof. dr. Ljudvik Gyergyek, Fakulteta za elektrotehniku Ljubljana; prof. dr. Bernislav Jurković, Elektrotehnički venski savez za ETAN, Beograd; dr. Slobodan Radoman, Institut »M. Pupin«, Beograd; dr. Bruno Rusjan, Iskra, Elektromehanika TOZD TTS, Ljubljana; prof. dr. Asif Šebanović, Energoinvest IRCA, Sarajevo; dr. Bruno Štiglic, fakultet, Zagreb; dr. Nenad Marinović, Elektrotehnički institut »R. Končar«, Zagreb; prof. dr. Vladimir Muljević, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; Jovo Pavlović, Jugoslaviska Industrija za avtomatiku, Ljubljana; prof. dr. Tugomir Surina, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; prof. dr. Rajko Tomović, Elektrotehnički fakultet, Beograd; Marijan Zambeli, ATM, Zagreb.

### GLAVNI UREDNIČKI ODBOR

Predsjednik: prof. Jože Černelc, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; prof. dr. Paja Čmer, Tehnička vojna akademija, Zagreb; prof. dr. Milan Čalović, Elektrotehnički fakultet, Beograd; mr. Fikret Čejvan, ATM, Zagreb; prof. dr. Ljubiša Draganović, Energoinvest IRCA, Sarajevo; prof. Vaso Gluhajčić, Institut »M. Pupin«, Beograd; prof. dr. Abduraman Grapci, Tehnički fakultet, Priština; prof. dr. Emir Humo, Univerzitet »Dž. Bijedić«, Mostar; prof. dr. Janko Janković, Tehnički fakultet, Titograd; Danijel Jurjevec, Savezna privredna komora, Beograd; dr. Vukašin Masnikosa, Institut »M. Pupin«, Beograd; Vladimir Matijević, INEM, SOUR »R. Končar«, Zagreb; prof. dr. Vladimir Muljević, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; prof. dr. Anton Ogorelec, Fakulteta za elektrotehniku, Ljubljana; prof. dr. Neozar Pašalić, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; prof. dr. Borivoje Rajković, Elektrotehnički institut »R. Končar«, Zagreb; Branko Bobavs, Iskra, Industrija za avtomatiku, Ljubljana; prof. dr. Milić Stojić, Elektrotehnički fakultet, Beograd; Anton Stusek, Fakulteta za strojarstvo, Ljubljana; prof. dr. Pane Vidinčev, Elektrotehnički fakultet, Skopje; prof. dr. Miomir Vukobratović, Institut »M. Pupin«, Beograd; dr. Anton Zelezničar, Elektrotehna-Delta, Razvoj software, Ljubljana;

### UZI UREDNIČKI KOLEGIJ

Jože Černelc, Vladimir Matijević, dr. Nedžad Pašalić, dr. Borivoje Rajković

### GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK

Jože Černelc

Tehnički urednik: Zarko Pavunić

Sekretar Glavnog uredničkog odbora: Zlatka Vranješević

Uredništvo i administracija časopisa: »AUTOMATIKA« Zagreb, Unska ulica br. 17, poštanski pretinac 123 (Elektrotehnički fakultet) telefon 514-911, 515-411 interni 270 i 284 Rukopise, preplate, narudžbe oglasa, objave i drugo slati na adresu uredništva. Rukopisi se ne vraćaju.

Godišnja pretplata za pravne osobe 4000 dinara — za pojedince 80 dinara — za inozemstvo 24 dolara USA — Pojedini broj izvan pretplate: za pojedince 30 dinara, za pravne osobe 100 dinara. Poštarina plaćena u gotovu. — List se naručuje na adresu Zagreb, a uplaćuje se na ŽIRO RAČUN KOD KREDITNE BANKE ZAGREB 30102-678-5668 JUREMA — Zagreb (za »Automatiku«)

Tisak: GRAFIČKI ZAVOD HRVATSKE — ZAGREB

### UREDNIČKI ODBOR BEOGRAD

Dr. Vukašin Masnikosa, dr. Stanoje Bingulac, dr. Milan Čalović, mag. Mihailo Corović, dr. Miladin Kršmanović, Branko Milosavljević, dr. Peter Miljanić, dr. Nenad Simić, dr. Milić Stojić

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Vukašin Masnikosa, Institut »Mihailo Pupin«, Volgina 15, 11000 Beograd

### UREDNIČKI ODBOR LJUBLJANA

Dr. Anton Ogorelec, dr. France Bremšak, dr. Rafael Čajhen, dr. Ferdo Gubira, Alojz Hussu, Matija Seiger, Stane Slapšak, Jure Tasić, Miha Tomšič, Dimitrij Uran

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Anton Ogorelec, Fakulteta za elektrotehniku, Tržaška 25, 51000 Ljubljana

### UREDNIČKI ODBOR MARIBOR

Bruno Štiglic, Igor Kapus, Ivan Lešnik, Bogdan Naprudnik, Anton Travan Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke Bruno Štiglic Kamniška 4a, 62000 Maribor

### UREDNIČKI ODBOR NOVI SAD

Dr. Dušan Jakšić, dr. Miodrag Bogosavljević, Aleksandar Dirner, Đorđe B. Kovačević, Gavro Vidaković

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Dušan Jakšić, Mašinski fakultet, Vladimira Perića-Valtera 22, 21000 Novi Sad

### UREDNIČKI ODBOR SARAJEVO

Dr. Emil Humo, Dževad Hasanbegović, Petar Kesić, dr. Ahmed Mandžić, dr. Božidar Matić

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Emir Humo, Elektrotehnički fakultet, Hasana Brkića 8, 71000 Sarajevo

### UREDNIČKI ODBOR SKOPLJE

Dr. Pane Vidinčev, Ljupče Arnaudov, Trpo Gručevski, Todor Jakimov, Milčo Kocarev

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Pane Vidinčev Elektromašinski fakultet, Skopje

### UREDNIČKI ODBOR SPLIT

Dr. Petar Gugić, dr. Milojko Čišić, dr. Petar Slapničar, mr. Ratko Zanetić, Stanko Mimica  
Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Petar Gugić, Elektrotehnički fakultet, Ribarova 4, 51000 Split

### UREDNIČKI ODBOR ZAGREB

Vladimir Matijević, dr. Ramiz Abduli, mr. Zvonko Bendić, dr. Leo Budin, mr. Muamer Hamidović, mr. Marica Jurišić-Zec, dr. Božidar Vojnović, Predrag Vrančić, Ivo Zgombić

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke Vladimir Matijević, INEM, SOUR »R. Končar«, Baštjanova bb, 41001, Zagreb.

Na osnovu mišljenja Republičkog sekretarijata za prosvjetu, kulturu i fizičku kulturu SR Hrvatske br. 788/1-1973, od 8. ožujka 1973. časopis Automatika smatra se proizvodom iz čl. 36. stava 1. točke 7. Zakona o oporezivanju proizvoda i usluga i tarifnog broja 7. stava 2. Tarife posebnog republičkog poreza na promet proizvoda, za koje se ne plaća porez na promet proizvoda.

Slika na naslovnoj strani:

### ENERGETSKI DIO JEDNOFAZNOG STABILIZATORA NAPONA YACP-16 KVA, PROIZVODNJE RADE KONČAR, RO INEM

Ovo je drugi dvobroj našeg časopisa posvećen isključivo području energetske elektronike. Prvi dvobroj (Automatika 1—2 1978) izdan je u povodu održavanja Trećeg savjetovanja o energetskoj elektronici. Namjera nam je da i ubuduće povremeno izdajemo brojeve posvećene energetskoj elektronici.

# automatika

JUGOSLAVENSKI ČASOPIS ZA AUTOMATIZACIJU I INFORMATIKU

YU ISSN 0005-1144

Godina 21—1980.

ATMTKA 21 (1—2), 1—72 (1980)

BROJ

1-2

UDK 681.5 + 681.2/3 + 62 + 67 (05) = 861/6/ = 20

## SADRŽAJ

- |   |   |
|---|---|
| <i>Zvonko Benčić</i>                            | 3 Područje energetske elektronike   |
| <b>Originalni naučni članci</b>                 |   |
| <i>Nedžad Pašalić</i>                           | 11 Modulacija impulsa tranzistorskog pretvarača u istosmjernom elektromotornom pogonu                       |
| <i>Branislav Kuzmanović</i>                     | 19 Analiza prenapona oporavka energetskih poluvodičkih ventila u omsko-induktivnom krugu                    |
| <i>Darko Stipaničev</i>                         | 23 Rezonantne pojave kod linijskih filtera za suzbijanje VF i RF smetnji                                    |
| <b>Prethodno saopćenje</b>                      |   |
| <i>Siegfried Thamm</i><br><i>Lutz Grüder</i>    | 31 O primjeni pretvarača za kompenzaciju viših harmonika  |
| <b>Stručni članci</b>                           |   |
| <i>S. B. Dewan</i><br><i>A. Joshi</i>           | 35 Višeosovinski elektromotorni pogoni s tiristorskim izmjenjivačima u izmjeničnoj električnoj vuči         |
| <i>Marijan Franković</i><br><i>Zvonko Tomac</i> | 43 Prikaz statičkog postrojenja za besprekidno napajanje elektroničkih uređaja u telekomunikacijskom centru |
| <i>Janđro Šimić</i>                             | 49 Uvod u elektromagnetsku kompatibilnost u energetskej elektronici   |
| <i>Tomislav Brodić</i>                          | 55 Pouzdanost elemenata i sklopova energetske elektronike   |
|   | 63 Savjetovanje i priredbe  |
|   | 69 Automatizacija u riječi i slici  |

*Darko Stipanić*

## Rezonantne pojave kod linijskih filtera za suzbijanje VF i RF smetnji

UDK 621.391.82  
 IFAC IA 4.0.1.2

Originalni naučni članak

Jedan od velikih problema kod linijskih filtera za suzbijanje VF i RF smetnji je problem rezonancija. Razlikujemo tri vrste rezonantnih pojava: rezonancije opterećenog filtera, vlastite rezonancije i osciliranje. Prve dvije rezonantne pojave su prisutne stalno za vrijeme rada filtera, dok se treća javlja samo prilikom uključivanja, odnosno isključenja filtera.

U referatu su obradene rezonancije opterećenog filtera i vlastite rezonancije. Prikazana je fenomenologija nastanka tih rezonancija, njihove posljedice i metode otklanjanja posljedica prigušivanjem filtera.

Dani su izrazi za proračun vrijednosti prigušnih komponenta elementarnih filtera, kao i princip programa za elektroničko računalo za proračun vrijednosti prigušnih komponenta složenih, kaskadnih filtera.

Teoretski rezultati su provjereni eksperimentalno, pa su dani rezultati mjerenja elementarnog filtera L tipa prigušenog RC članom.

**Resonances in Power — Line Filters for the Suppression of High - and Radio - Frequency Interferences.** Resonances can be a very serious problem, and can severely impair filter's performances. They are of three kinds: interfacial resonances, self resonances and ringing.

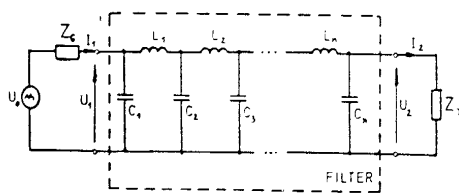
The paper deals with interfacial resonances and self resonances. It is shown when and why they happen, what are their effects, and which methods we use for their damping.

The damping components of the elemental EMI filters can be calculated analytically using the equations from this paper. The paper also describes principles of the computer program for designing more complex EMI filters.

Theoretical results are verified experimentally and the results of measuring elemental L-section filter damped with the RC member are also given.

### UVOD

Linijski filteri za suzbijanje visokofrekventnih (VF) i radiofrekvencijnih (RF) smetnji su pasivni, recipročni, niskopropusni, kaskadni LC filteri s diskretnim komponentama. Osnovnu električnu shemu filtera prikazuje slika 1.



Sl. 1. Osnovna električna shema kaskadnog LC filtera

Efikasnost filtera, odnosno njegovu djelotvornost izražavamo unesenim gušenjem. Uneseno gušenje je logaritamski odnos između snage koju izvor predaje teretu, dok filter nije uključen u liniju, prema snazi koju izvor predaje teretu nakon što uključimo filter u liniju između izvora i tereta.

Preko prijenosnih parametara određenih matricnom jednadžbom:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

koji jednoznačno definiraju svojstva filtera, uneseno gušenje možemo izraziti:

$$a_u = 20 \cdot \log^2 x; \quad (2)$$

gdje je  $x$  uneseni naponski omjer:

$$x = \frac{a_{11} Z_T + a_{12} + a_{21} Z_G Z_T + a_{22} Z_G}{Z_G + Z_T}. \quad (3)$$

$Z_G$  je impedancija izvora smetnji, a  $Z_T$  impedancija tereta. Uneseno gušenje je prema tome funkcija opterećenih impedancija filtera.

Kod linijskih filtera razlikujemo tri vrste rezonantnih pojava:

1. rezonancija opterećenog filtera
2. vlastite rezonancije
3. osciliranje

Prve dvije rezonantne pojave su prisutne stalno za vrijeme rada filtera, dok se treća javlja samo prilikom uključivanja odnosno isključivanja filtera. Ovdje ćemo se samo baviti s prve dvije rezonantne pojave.

Kako se radi o pasivnim LC filterima prijenosni parametri  $a_{mn}$  mogu imati nultočke. U slučaju parnog ekstremnog opterećenja iako su  $a_{12}$  i  $a_{21}$  nula,  $x$  nikada ne može postati nula. Uneseno pojačanje se ne javlja, već imamo samo propade na krivulji unesenog gušenja. Kod neparnog opterećenja na frekvencijama nultočaka prijenosnih parametara  $a_{11}$  i  $a_{22}$  uneseni naponski omjer  $x$  je jednak nuli, javljaju se vlastite rezonancije i kao posljedica negativno uneseno gušenje, odnosno uneseno pojačanje ( $a_u = \log 0 = -\infty$ ).

Prema tome vlastite rezonancije se javljaju kod neparnog ekstremnog opterećenja filtera. Međutim u praksi situaciji neparnog ekstremnog opterećenja da  $Z_G \rightarrow 0$ , a  $Z_T \rightarrow \infty$  se već dovoljno približimo ako je  $Z_G Z_{01} < 0,1$ , a  $Z_T Z_{02} > 10$ , odnosno situaciji da  $Z_G \rightarrow \infty$ , a  $Z_T \rightarrow 0$  ako je  $Z_G Z_{01} > 10$ , a  $Z_T Z_{02} < 0,1$ .

Kod linijskih filtera ti uvjeti su često ispunjeni, pa vlastite rezonancije, odnosno uneseno pojačanje predstavlja jedan od važnih problema o kojemu se mora voditi računa prilikom projektiranja filtera.

Vlastite rezonancije se javljaju samo ukoliko je red filtera (broj filterskih komponenti) veći od jedan.

Broj rezonantnih frekvencija na kojima dolazi do vlastitih rezonancija jednak je broju elementarnih filtera\* od kojih je filter sastavljen. Rezonantne frekvencije možemo računati na nekoliko načina:

- traženjem minimuma krivulje unesenog gušenja za ekstremne uvjete opterećenja, odnosno rješavanjem jednadžbe  $a_{11} = 0$  ili  $a_{22} = 0$ ;
- izjednačenjem determinante matrice impedancija petlji s nulom  $Z_p = 0$  uz zamjenu  $s = j\omega$ ;
- izjednačenjem ulazne impedancije, odnosno admitancije filtera (koji sada promatramo kao dvopol) s nulom. U slučaju  $Z_G \rightarrow 0$ ,  $Z_T \rightarrow \infty$  vrijedi  $Z_{ul} = 0$ , a u slučaju  $Z_G \rightarrow \infty$ ,  $Z_T \rightarrow 0$  vrijedi  $Y_{ul} = 0$ .

Na početku smo pretpostavili da su komponente filtera idealne. Realne prigušnice i kondenzatori sadrže parazitske kapacitete, induktivitete i otpore. Posljedica nesavršenosti komponenata je da dobijemo još složenije, ali djelomično prigušeni titrajni krug.  $Q$  — faktor takvog titrajnog kruga je još uvijek puno veći od 1, pa se mogu očekivati veliki iznosi unesenog pojačanja. Situacija je ipak nepovoljnija kod filtera s idealnim komponentama, pa je kod analize pojava rezonancija dovoljno promatrati samo idealan filter za koga su ujedno i proračuni jednostavniji.

#### POSLEDICE REZONANTNIH POJAVA

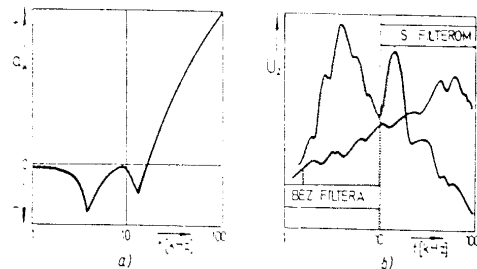
Rezonancije opterećenog filtera i vlastite rezonancije uzrokuju pojavu negativnog unesenog gušenja, odnosno unesenog pojačanja.

\* Elementarni filteri su filteri L, H i T tipa.

Kod rezonancija opterećenog filtera uneseno pojačanje je obično manje od 10 dB, zato što opteretne impedancije imaju određenu realnu komponentu, pa su rezonancije prigušene. Puno veći iznosi unesenog pojačanja (i do 40 dB) javljaju se kod vlastitih rezonancija. Zbog toga vlastite rezonancije predstavljaju puno veći problem.

Zbog unesenog pojačanja u određenom frekventcijskom području napon smetnji će biti pojačan nakon ugradnje filtera. Što je filter složeniji, to je frekventcijsko područje u kojem se javlja pojačanja šire.

Slika 3. a. prikazuje krivulju unesenog gušenja složenog, neprigušenog LC filtera uz takvo opterećenje da dolazi do pojave vlastitih rezonancija. Slika 3. b. prikazuje napon smetnji na teretu prije i poslije ugradnje takvog neprigušenog filtera.



Slika 3. a) Uneseno gušenje neprigušenog složenog LC filtera uz  $Z_G Z_{01} < 0,1$  i  $Z_T Z_{02} > 10$ . b) Napon smetnji na teretu prije i poslije ugradnje neprigušenog filtera

Očito je da je u frekventcijskom području rezonancija situacija gora s filterom ukoliko je on neprigušen, nego bez filtera. Zbog toga se filter mora na odgovarajući način prigušiti.

#### OTKLANJANJE POSLEDJICA REZONANTNIH POJAVA PRIGUŠIVANJEM FILTERA

Posljedicu rezonantnih pojava: uneseno pojačanje otklanjamo unošenjem frekventcijski selektivnih gubitaka u filter. Filter moramo prigušiti u području rezonantnih frekvencija, a na radnoj frekvenciji filtera (kako se radi o linijskim, mrežnim filterima to je 50 Hz) gubici se ne smiju pojaviti.

Gubitke možemo unjeti u izvor smetnji, u teret, u vod kojim je filter spojen s izvorom i teretom ili u sam filter. Kako najčešće u toku projektiranja filtera ne znamo gdje će filter biti ugrađen, pogodnije je unositi gubitke u spojni vod ili u filter, nego u izvor smetnji ili u teret. Zbog toga ćemo isključivo promotriti unošenje gubitaka u spojni vod ili u filter.

#### Unošenje gubitaka u vod

Korištenjem specijalnih vodova s gubicima, rezonancije se mogu prigušiti, a svojstva filtera u području gušenja poboljšati [L. 6,7]. Pri tome se koriste tri osnovne tehnike: dielektrična i magnetska apsorpcija, pseudorezonantni efekt i «umjetni» skin-efekt.

Kod prve tehnike koristi se svojstvo magnetskih i dielektričnih materijala da zbog apsorpcije stvaraju električne gubitke ukoliko se nalaze u promjenljivoj magnetskom i električnom polju. Gubici se pojavljuju samo na višim frekvencijama, dok su za istosmjernu komponentu i na nižim frekvencijama zanemarivi.

Kod pseudorezonantnog efekta na spojne vodove i kabele se unosi specijalna selektivna apsorpcija korištenjem pomoćne reaktivne komponente, tako da se stvori paralelni titrajni krug. Jedan način izvedbe je djelomično, lokalno metaliziranje vanjske strane voda. Maksimalna apsorpcija, a s tim i maksimalni gubici su u okolini rezonantne frekvencije tako stvarnog titrajnog kruga i mogu se mijenjati mijenjanjem geometrijskih parametara spojnog voda.

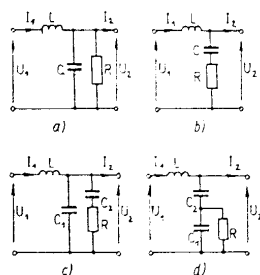
Ukoliko se bakreni vodič obloži omotačem takvih karakteristika, da je vodljivost omotača na mjestu kontakta s vodičem velika i približava se vodljivosti bakra, a udaljavanjem od vodiča pada, tako da na rubovima karakteristike omotača odgovaraju dobrom izolatoru postiže se «umjetni» skin-efekt. Mijenjanjem vodljivosti materijala omotača mijenja se i frekvencija maksimalne apsorpcije.

Loše strane metode unošenja gubitaka u spojni vod su u tome što se efekti prigušenja očituju samo ukoliko su vodovi dugački (više od 5 m) [L. 6] i na visokim frekvencijama (iznad 10 MHz) [L. 7].

**Unošenje gubitaka u filter**

Filteri za suzbijanje VF i RF smetnji sadrže dvije vrste grana: paralelno-kapacitivne i serijsko-induktivne. (sl. 1). Prema tome gubici se mogu unjeti bilo u paralelno-kapacitivnu, bilo u serijsko-induktivnu granu.

**Unošenje gubitaka u paralelno-kapacitivnu granu.** Gubitke u paralelno-kapacitivnu granu unosimo dodavanjem otpornika. Četiri osnovna načina spajanja otpornika na primjeru elementarnog *L* filtera prikazuje slika 4.



Sl. 4. Osnovni načini unošenja gubitaka u paralelno-kapacitivnu granu dodavanjem otpornika *R*

Paralelnim spajanjem otpornika *R* kondenzatora *C* (sl. 4. a) uneseno pojačanje se smanjuje smanjivanjem otpornika *R*. Međutim ukoliko je otpornik mali, gubici na nazivnoj frekvenciji filtera su veliki, pa ovaj način prigušenja filtera nije dobar.

Serijskim spajanjem otpornika *R* kondenzatoru *C* (sl. 4. b) uneseno pojačanje se smanjuje povećavanjem vrijednosti otpornika. Zbog velikog otpornika *R* biti će impedancija paralelne grane velika u cijelom frekvencijskom području, pa i u području gdje filter mora gušiti smetnje. Svojstva filtera će zato biti narušena, pa ni ovaj način prigušivanja filtera nije dobar.

Bolja kombinacija su filteri sa slike 4. c. i 4. d. U slučaju dodavanja još jednog kondenzatora *C*<sub>2</sub> i otpornika *R* (*RC* član) kao na slici 4. c., otpornik predstavlja serijsko prigušenje kondenzatora *C*<sub>2</sub>, a paralelno prigušenje kondenzatora *C*<sub>1</sub>. Gubici na nazivnoj frekvenciji su mali, svojstva filtera u području gušenja dobra, a uneseno pojačanje se može smanjiti na po volji malu vrijednost. Slična je situacija i s filterom sa slike 4. d., samo što kod nega kapaciteti kondenzatora *C*<sub>1</sub> i *C*<sub>2</sub> moraju biti veći, da bi se osigurala dobra svojstva filtera u području gušenja.

Komponente filtera se računaju tako da se s njima smanji na minimum uneseno pojačanje uzrokovano vlastitim rezonancijama, zato što vlastite rezonancije predstavljaju najveći problem. Međutim na taj način se također prigušuju i rezonancije opterećenog filtera ukoliko do njih dođe.

Kao što smo vidjeli vlastite rezonancije se javljaju i nisu zanemarive ukoliko je  $Z_G/Z_{01} < 0.1$  a  $Z_T/Z_{02} > 10$  ili obrnuto. Za analizu, takvo opterećenje filtera se može zamjeniti ekstremnim neparnim opterećenjem. Greška je pri tome mala.

Vrijednosti komponenata je potrebno tako odrediti da uneseno gušenje u području gušenja bude zadovoljavajuće, a uneseno pojačanje što je god moguće manje. Elementarne prigušene filtere moguće je proračunati analitičkim metodama.

Vrijednost serijskog induktiviteta *L* određena je najčešće maksimalno dopuštenim padom napona *U*<sub>*L*max</sub> na serijskoj grani filtera. Računa se iz jednadžbe:

$$L = \frac{U_{Lmax}}{2\pi f_N \cdot I_N} \tag{5}$$

*f*<sub>*N*</sub> — nazivna frekvencija [Hz]

*I*<sub>*N*</sub> — nazivna struja filtera [A].

Kod filtera sa slike 4. c. zahtjev za uneseno gušenje *a*<sub>*u*</sub> [dB] u području gušenja na frekvenciji *f*<sub>*g*</sub> određuje vrijednost kondenzatora *C*<sub>1</sub>. Na frekvenciji *f*<sub>*g*</sub> ptjecaj *RC* člana na uneseno gušenje filtera se može zanemariti, pa se *C*<sub>1</sub> računa iz jednostavnog izraza:

$$C_1 = \frac{10^{\frac{a_u}{20}}}{(2\pi f_g)^2 \cdot L} \tag{6}$$

Kod filtera sa slike 4. d. na taj način se odredi vrijednost paralelnog spoja kondenzatora *C*<sub>1</sub> i *C*<sub>2</sub>.

Iako se filter prigušuje uneseno pojačanje će i dalje biti prisutno, ali se može učiniti po volji malo. Mi-

D. Stipančev

nimalno uneseno pojačanje (minimalno negativno uneseno gušenje) je funkcija omjera kondenzatora  $C_2$  i  $C_1$  ( $\epsilon = C_2/C_1$ ):

$$a_{\text{umin}} = 20 \cdot \log \frac{\epsilon}{\epsilon - 2} \quad (7)$$

Slika 5. prikazuje ovisnost minimalnog unesenog naponskog omjera i minimalnog unesenog pojačanja o parametru  $\epsilon = C_2/C_1$ .

Vidi se da zahtjev za dozvoljeno uneseno pojačanje na rezonantnoj frekvenciji filtera i vrijednost kondenzatora  $C_1$  određuje vrijednost kondenzatora  $C_2$ ; filtera sa slike 4. c. Kod filtera sa slike 4. d. vrijednost kondenzatora  $C_1$  i  $C_2$  određujemo iz poznate vrijednosti njihovog paralelnog spoja i vrijednosti parametra  $\epsilon = C_2/C_1$ .

Sada, kada su poznate vrijednosti  $L$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  i  $\epsilon = C_2/C_1$  optimalna vrijednost otpornika  $R_0$  za koju će uneseno pojačanje biti minimalno određuje se iz sljedećih izraza:

— za filter sa slike 4. c. [L. 8]:

$$R_0 = \frac{1}{\epsilon} \cdot \sqrt{\frac{L}{C_1}} (1 - \epsilon) \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right) \quad (8)$$

— za filter sa slike 4. d.:

$$R_0 = \frac{1}{1 - \epsilon} \sqrt{\frac{L}{C_1}} \epsilon \left(1 - \frac{\epsilon}{2}\right) \quad (9)$$

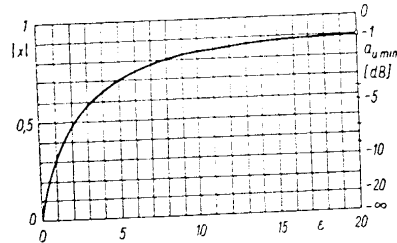
Rezonantna frekvencija na kojoj će biti ovo minimalno uneseno pojačanje je:

— za filter sa slike 4. c. [L. 8]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_1 (1 - \epsilon^2)}} \quad (10)$$

— za filter sa slike 4. d.:

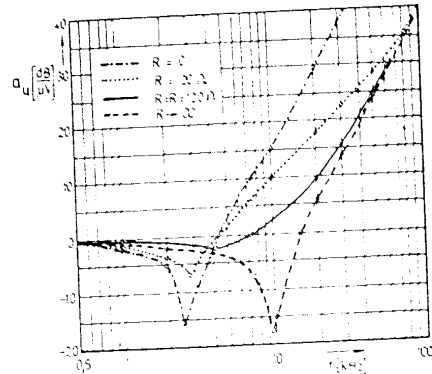
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_1 \epsilon (1 - \epsilon^2)}} \quad (11)$$



Sl. 5. Ovisnost minimalnog unesenog pojačanja o parametru  $\epsilon = C_2/C_1$

Slika 6. prikazuje rezultate mjerenja unesenog gušenja elementarnog  $L$  filtera prigušenog  $RC$  članom (sl. 4. c) uz različite vrijednosti otpornika  $R$ . Uneseno pojačanje je minimalno za vrijednost otpornika izračunatog jednadžbom (8) (120 ohma). Izmjereno

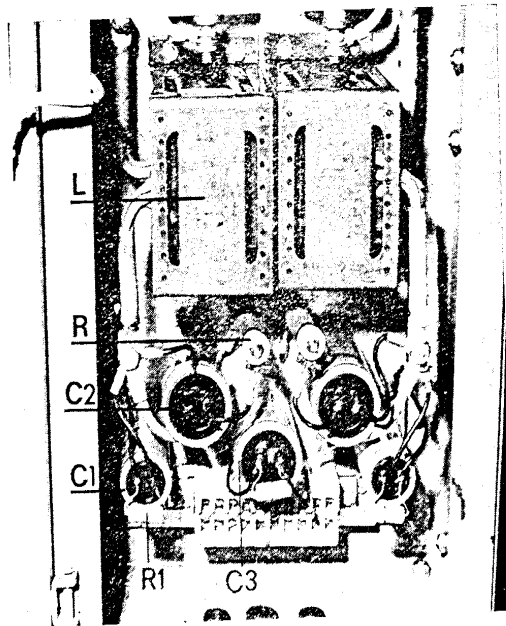
minimalno uneseno pojačanje je na frekvenciji 4.38 kHz i iznosi 1.58 dB. Korištenjem jednadžbi (7) i (10) dobije se  $f_0 = 4.08$  kHz i  $a_{\text{umin}} = 1.48$  dB. Računski rezultati se dobro slažu s izmierzanim vrijednostima.



Sl. 6. Rezultati mjerenja unesenog gušenja elementarnog  $L$  filtera prigušenog  $RC$  članom.  $L = 2.2$  mH;  $C_1 = 0.1$   $\mu$ F;  $C_2 = 1$   $\mu$ F;  $Z_0 = 120$   $\Omega$ ;  $Z_1 = 1$  M $\Omega$ ; 35 pF

Slika 7. prikazuje fotografiju jednofaznog filtera nazivne struje 25 A prigušenog  $RC$  članom. Na slici se može vidjeti i otpornik  $R_1$  koji služi za pražnjenje kondenzatora nakon isključenja filtera i kondenzator  $C_3$  između dvije faze.

Svi navedeni izrazi vrijede i za simetrične filtere II tipa koji imaju prigušene obe kapacitivne grane i za filtere T tipa. Kako su filteri simetrični rezultat je isti za obadva uvjeta neparanog ekstremnog opterećenja (za simetrične filtere  $a_{11} = a_{22}$ ).



Sl. 7. Fotografija jednofaznog filtera nazivne struje 25 A prigušenog  $RC$  članom

Analički proračun vrijednosti komponenata složenih, kaskadnih filtera (sl. 1) je nepraktičan, zato što su jednačbe velike i nepregledne. Jednostavnije je koristiti odgovarajući program za elektroničko računalno. Pogodna matematička metoda je metoda iteracije. Optimalna vrijednost otpornika  $R$  raste s brojem elementarnih filtera od kojih je sastavljen složeni filter. U prvom koraku uzme se vrijednost otpornika izračunata jednačbom (8) ili (9). Za taj  $R$  računa se vrijednost unesenog pojačanja. Nakon toga vrijednost otpornika se poveća i ponovo se računa uneseno pojačanje. Vrijednost otpornika za koji je uneseno pojačanje minimalno je optimalna vrijednost otpornika koju tražimo.

Na primjer za filter koji u svim serijskim granama ima induktivitet  $L = 100 \mu\text{H}$  i u svim paralelnim granama kapacitete  $C_1 = 1 \mu\text{F}$  i  $C_2 = 10 \mu\text{F}$  (sl. 4. c), ovisno o složenosti filtera ( $N$  = broj elementarnih filtera) dobivamo slijedeće rezultate:

$$N = 1 \quad R_0 = 8,12, \quad f_0 = 6,50 \text{ kHz},$$

$$a_{\text{unin}} = -1,58 \text{ dB}$$

$$N = 2 \quad R_0 = 12,50, \quad f_0 = 3,98 \text{ kHz},$$

$$a_{\text{unin}} = -1,97 \text{ dB}$$

$$N = 4 \quad R_0 = 21,90, \quad f_0 = 2,29 \text{ kHz},$$

$$a_{\text{unin}} = -2,15 \text{ dB}$$

**Unošenje gubitaka u serijsko-induktivnu granu.**

Gubitke u serijsko-induktivnu granu unosimo u obliku magnetskih gubitaka, gubitaka u namotu ili dodavanjem otpornika.

Magnetske gubitke povećavamo upotrebom magnetskog materijala veće petlje histerese ili korištenjem debljih magnetskih limova. Nezgodno je to što se također povećavaju gubici na nazivnoj frekvenciji filtera.

Gubitke u namotu povećavamo korištenjem višeslojnog namatanja i upotrebom blizinskog efekta [L. 9]. Odgovarajućim načinom namatanja i izborom izolatora moguće je postići da se otpor serijske grane na nazivnoj frekvenciji filtera ne mijenja, a da porastom frekvencije raste. Filter se prilagođuje na rezonantnoj

frekvenciji, ali mu se i svojstva u području gušenja poboljšavaju.

Otpornik u serijsku granu možemo isto kao i u paralelnu granu spojiti na četiri načina kako prikazuje slika 8.

Paralelnim spajanjem otpornika (sl. 8. a) uneseno pojačanje se smanjuje smanjivanjem otpornika  $R$ , ali se time i narušavaju svojstva filtera u području gušenja.

Serijskim spajanjem otpornika (sl. 8. b.) uneseno pojačanje se smanjuje povećavanjem otpornika  $R$ , ali se time povećavaju gubici na nazivnoj frekvenciji filtera i pad napona na serijskoj grani.

Dodavanjem otpornika i još jedne prigušnice (sl. 8. c. i d) moguće je postići zadovoljavajuće gušenje filtera u području gušenja, smanjiti uneseno pojačanje i smanjiti gubitke filtera na nazivnoj frekvenciji filtera.

Vrijednost induktiviteta prigušnica  $L_1$  i  $L_2$  i kapaciteta kondenzatora  $C$  filtera sa slike 8. c. i d. se određuje iz dozvoljenog pada napona na serijskoj grani, zahtjeva za uneseno gušenje i dozvoljenog iznosa unesenog pojačanja, slično kao i kod filtera sa slike 4. c. i d. Jednačba za minimalno uneseno pojačanje (7) i krivulja na slici 5. i ovdje vrijedi, samo što je sada  $\epsilon = L_2/L_1$ .

Kada se poznaju vrijednosti  $C$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  i  $\epsilon = L_2/L_1$  optimalna vrijednost otpornika  $R_0$  se računa iz izraza:

— za filter sa slike 8. c.:

$$R_0 = (1 - \epsilon) \sqrt{\frac{L_1}{C} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon(1 - \epsilon/2)}} \quad (12)$$

— za filter sa slike 8. d.:

$$R_0 = \epsilon \sqrt{\frac{L_1}{C} \frac{2 - \epsilon}{2 - \epsilon}} \quad (13)$$

Rezonantna frekvencija na kojoj će biti ovo minimalno uneseno pojačanje je:

— za filter sa slike 8. c.:

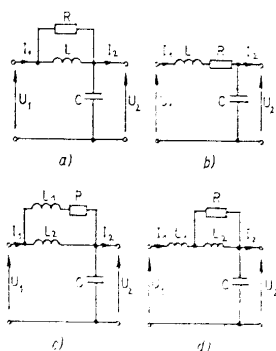
$$f_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1 - \epsilon}{2L_1 C \epsilon (2 + \epsilon)}} \quad (14)$$

— za filter sa slike 8. d.:

$$f_0 = \frac{1}{\pi \sqrt{2} L_1 C (2 + \epsilon)} \quad (15)$$

Izrazi vrijede i za filtere II tipa i za filtere T tipa koji imaju iste serijske grane.

Složene filtere je jednostavnije projektirati korištenjem elektroničkog računala metodom iteracije, kako je opisano u dijelu koji obraduje unošenje gubitaka u paralelno-kapacitivnu granu.



Sl. 8. Osnovni načini unošenja gubitaka u serijsko-induktivnu granu dodavanjem otpornika  $R$



**ZAKLJUČAK**

Ukoliko opteretne impedancije linijskog filtera za suzbijanje VF i RF smetnji zadovoljavaju određene uvjete dolazi do pojave rezonancije.

Posljedica rezonancija opterećenog filtera i vlastitih rezonancija je uneseno pojačanje koje može iznositi i do 40 dB. Zbog unesenog pojačanja kod određenih primjena filtera situacija se može pogoršati nakon ugradnje filtera, zato što će napon smetnji u frekvencijskom području rezonancije biti povećan.

Prigušenjem filtera uneseno pojačanje se ne može potpuno otkloniti, ali se može minimizirati. Filter možemo prigušiti na nekoliko načina unošenjem frekvencijski selektivnih gubitaka.

Ukoliko se filter prigušuje dodavanjem otpornika vrijednosti komponenata elementarnih filtera se mogu proračunati analitičkim metodama. Teoretski rezultati se dobro slažu s eksperimentom. Složene filtere je jednostavnije računati korištenjem elektroničkog računala.

**LITERATURA:**

- [1] J. H. Bull, **Impedance of the Supply Mains on RF**, EMC 1975 1st Symposium on EMC, str. 357—362, Montreux 1975.

- [2] J. A. Malack, J. R. Engstrom, **RF Impedance of US and European Power Lines**, IEEE Trans. on EMC, Vol. 18, No. 1, str. 36—38, Feb. 1976.
- [3] H. M. Schlicke, **Assuredly Effective Filters**, IEEE Trans. on EMC, Vol. 18, No. 3, str. 106—110, Aug. 1976.
- [4] W. C. Johnson, **Transmission Lines and Networks**, McGraw-Hill Kogakusha, LTD., Tokyo, 1950.
- [5] »**SCR Manual**«, General Electric, Fifth edition, New York, 1972.
- [6] H. M. Schlicke, H. Weidman, **Compatible EMI filters**, IEEE Spectrum, Vol. 4, str. 59—68, Oct. 1967.
- [7] F. Mayer, **EMC: anti-interference wires, cables and filters**, IEEE Trans. on EMC, Vol. 8, str. 153—160, Sept. 1966.
- [8] D. Stipaničev, **Damping of resonances in RFI filters with RC members**, EMC 1979, 3rd Symposium on EMC, str. 547—552, Rotterdam, 1979.
- [9] I. W. Ha, R. B. Yarbrough, **A Lossy Element for EMC filters**, IEEE Trans. on EMC, Vol. 18, No. 4, str. 141—148, Nov. 1976.

**NASLOV AUTORA:**

Darko Stipaničev, »Rade Končar« Zagreb

Članak je primljen u redakciju: 12. VII 1979.