

Časopis izdaje Jugoslavenski savez za
ETAN

Časopis izdaje Jugoslovska sveza za
ETAN

SUDJELUJU U SUFINANCIRANJU
Samoupravna interesna zajednica za
znanstveni rad SRH, Zagreb
Savez republičkih i pokrajinskih sa-
moupravnih interesnih zajednica za
naučne djelatnosti u SFRJ
Raziskovalna skupnost Slovenije,
Ljubljana

OSNIVACI
USTANOVITELJI

Energoinvest, poduzeće za projekto-
vanje i izgradnju energetske i indu-
strijskih postrojenja, Sarajevo — Zdru-
ženo podjetje Iskra-Kranj — Jugosla-
venski savez za elektroniku, teleko-
munikacije, automatiku i nuklearnu
tehniku (ETAN), Beograd — ATM Po-
duzeće za automatiku i tehniku mje-
renja u industriji Zagreb — Elektro-
tehnički institut poduzeća »Rade
Končar«, Zagreb — Fabrika »Teleopti-
ka« Zemun — Zavod za avtomatiza-
ciju, Ljubljana — Unimatik, poslovno
udruženje za automatizaciju, Beo-
grad

IZDAVAČKI SAVJET
ZALOŽNIŠKI SVET

Predsjednik: Ivo Bautović; članovi:
dr Petar Crnošija (predstavnik SIZ-a
za znanstveni rad SRH), Jože Černelč,
dr Božidar Francić, Pavel Ganter,
Ivica Gretić, dr Berislav Jurković,
Roman Klemenc, dr Nenad Marino-
vić, dr Božidar Matić, dr Vladimir
Muljević, Slobodan Radoman, dr Slo-
bodan Ristić, dr Bruno Rusjan, Duš-
ko Strujić, Tugomir Surina, Herman
Vidmar, Marijan Zambeli

GLAVNI UREDNIČKI ODBOR
GLAVNI UREDNIŠKI ODBOR

Predsjednik: Jože Černelč; članovi:
dr Paja Ciner, mr Fikret Čejvan,
Vaso Gluhajić, Stane Grčar, dr Emir
Humo, dr Janko Janković, Danijel
Jurjevac, dr Vukašin Masnikosa, Vla-
dimir Matijević, dr Vladimir Muljević,
dr Anton Ogorelec, Nedžad Pašalić,
dr Borivoje Rajković, dr Miodrag Ra-
kić, Branko Robavs, dr Milić Stojić,
dr Rajko Tomović, dr Pane Vidinčev,
dr Anton Železnikar

Tehnički urednik: Zarko Pavunić

Sekretar Glavnog uredničkog odbora:
Zlatka Vranješević

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK
GLAVNI IN ODGOVORNI UREDNIK

Jože Černelč

Uredništvo i administracija časopisa:
»AUTOMATIKA« Zagreb, Unska ulica
br. 17, poštanski pretinac 123 (Elek-
trotehnički fakultet) telefon 514-911,
515-411 interni 270 i 284

Rukopise, pretplate, narudžbe oglasa,
objave i drugo slati na adresu ured-
ništva. Rukopisi se ne vraćaju.

Godišnja pretplata za pravne osobe
400 dinara — za pojedince 80 dinara —
za inozemstvo 24 dolara USA — Po-
jedini broj izvan pretplate: za poje-
dince 30 dinara, za pravne osobe 100
dinara. Poštarina plaćena u gotovu.
— List se naručuje na adresu Zagreb,
a uplaćuje na ŽIRO RAČUN KOD
KREDITNE BANKE ZAGREB 30102-
678-5660 JUREMA — Zagreb (za »Au-
tomatiku«)

Tisak: GRAFIČKI ZAVOD HRVAT-
SKE — ZAGREB

1.4.1. automatika

JUGOSLAVENSKI ČASOPIS ZA AUTOMATIZACIJU I INFORMATIKU
JUGOSLOVANSKI ČASOPIS ZA AVTOMATIZACIJU I INFORMATIKU

Godina XIX 1978 • BROJ
Letnik XIX 1978 • ŠTEVILKA

1-2

SADRŽAJ

- Zvonko Benčić 3 III Savjetovanje »Energetska elektronika«
Zlatko Plenković 4 Uloga i značaj energetske elektronike
Nedžad Pašalić 7 Regulirani istosmjerni elektromotorni po-
gon s tranzistorima snage u energetskom
krugu
Stevo Mikac 13 Optimiranje izmjenivača sa zajedničkim
komutacijskim krugom za pogon asinhro-
nih motora
Josip Ungarov 18 Analiza tiristorskog pretvarača električne
lokomotive na digitalnom računalu
Nenad Rister 23 Čoper za pokretanje istosmjernih motora
Ivan Flegar 27 Faktor gušenja izlaznih istosmjernih filte-
ra pretvarača
Darko Stipaničev 34 Niz energetske filtera 10-630 A za suzbi-
janje VF i RF smetnji na uređajima i pos-
trojenjima energetske elektronike
Anton Lisac 40 Zaštitni krugovi jednog četverokradran-
nog čopera
Faruk Bilalović 43 Upravljanje mehaničkih koordinata kavez-
nog asinhronog motora
Asif Šabanović
Dimitrij Izosimov
Želimir Bobinac 47 Sinteza digitalne, analogne i energetske
elektronike kod rješenja ubravljanja ba-
gera s rotacionim kopačem
Dorđe Kalić 53 Tiristorski uređaj za automatsko ispitiva-
nje dizaličkih motora
Martin Jadrić 57 Matematički model asinhronog kaveznog
motora s visokim štapovima u rotoru
Stjepan Car 62 Dinamičke i statičke prilike u asinhronom
stroju napajanom iz statičkog pretvarača
Vladimir Fresl 70 Nadomjesna shema transformatora za kom-
paundaciju u sistemu samouzbude s kom-
paundacijom
Rafael Cajhen 75 Tiristorski pretvorniški sistem za nepreki-
njeno napajanje izmjeničnih parabnikov
Janez Nastran
Željko Arbanas 80 Vjernost prenošenja signala pomoću mjer-
nih članova istosmjerne struje
Borislav Stojanović 84 Merenje faktora snage
Petar Miljanić
Vladimir Petrović
87 Nove knjige i časopisi

Darko Stipaničev, Jandro Šimić

Niz energetske filtera 10–630 A za suzbijanje VF i RF smetnji na uređajima i postrojenjima energetske elektronike

DK 621.313:621.372.5.001.5
IFAC IA 4.0.1.2;5.5.4.6

Uređaji i postrojenja energetske elektronike uzrokuju svojim radom konduktivne električne smetnje. Najefikasniji način otklanjanja konduktivnih smetnji jest filtriranje.

U referatu je prikazan način projektiranja linijskih filtera za suzbijanje konduktivnih VF i RF smetnji. Zatim, prikazane su karakteristike niza energetske filtera za suzbijanje VF i RF smetnji prvenstveno namijenjenih suzbijanju smetnji na uređajima energetske elektronike.

Efikasnost gušenja filtera provjerena je na sistemu za besprekidno napajanje izmjeničnim naponom. Izmjeren je nivo konduktivnih smetnji prije i nakon ugradnje filtera.

A Series of 10–630 A Power Filters for the Suppression of High-and Radio-Frequency Interference on Power Electronics Equipments and Systems. Power electronics equipments and systems cause conducted interference. The best way of suppressing conducted interference is filtering.

This paper deals with the design of line RFI filters. The characteristics of power filters for current range from 10 A to 630 A are shown.

The efficiency of filters is checked by measuring conducted interference level with and without filter at the input and output terminals of an uninterruptable AC power supply system.

UVOD

Konduktivne električne smetnje uzrokovane radom uređaja i postrojenja energetske elektronike su dosta širokog frekventnog spektra: od tonfrekventnog, preko visokofrekventnog (VF) do radiofrekventnog (RF) područja. Najefikasniji način suzbijanja konduktivnih električnih smetnji je stavljanje filtera na ulaz i/ili izlaz uređaja.

Linijski filteri koji se koriste za suzbijanje VF i RF smetnji su pasivni, recipročni, niskopropusni filteri s diskretnim komponentama. Svrha filtera je da bez gušenja propuštaju električnu energiju nazivne frekvencije, a da sve neželjene električne signale iznad granične frekvencije priguše ispod maksimalno dozvoljenih vrijednosti.

NIVO VF I RF KONDUKTIVNIH SMETNJI UREĐAJA I POSTROJENJA ENERGETSKE ELEKTRONIKE

Pod pojmom VF smetnje podrazumijevamo neželjene električne signale frekvencije od 20 kHz do 150 kHz, dok pod pojmom RF smetnje podrazumijevamo neželjene električne signale frekvencije od 150 kHz do 1 GHz.

Razlikujemo simetrične i nesimetrične konduktivne VF i RF smetnje. Simetrične konduktivne smetnje se šire po vodičima pojnog voda, a zatvaraju se preko ekvivalentne impedancije pojnog voda. Nesimetrične konduktivne smetnje se šire vodičima

pojnog voda, a zatvaraju se preko ekvivalentne impedancije prema zemlji.

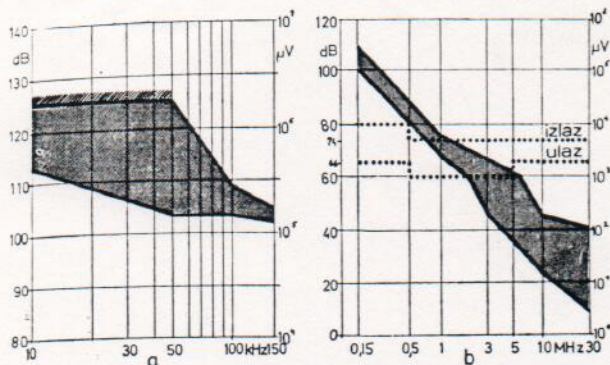
Nivo konduktivnih VF smetnji, kao i simetričnih konduktivnih RF smetnji za uređaje energetske elektronike nije ograničen propisima. Maksimalne vrijednosti napona nesimetričnih konduktivnih RF smetnji ograničavaju kako međunarodni, tako i jugoslavenski standardi i preporuke. Na slici 1.b prikazani su maksimalno dozvoljeni nivoi nesimetričnih konduktivnih RF smetnji prema JUS i CISPR*-a preporukama.

Napon nesimetričnih konduktivnih VF i RF smetnji izmjereno je na nizu različitih uređaja energetske elektronike. Mjerenja su vršena na ispravljačima, izmjenjivačima, pretvaračima, elektromotornim pogonima, tiristorskim sklopovima itd. Analizom rezultata mjerenja dobile su se krivulje na slici 1. Krivulje omeđuju područje unutar kojeg se nalaze vrijednosti napona smetnji najvećeg broja izmjerenih uređaja.

Konduktivne VF smetnje su znatne; iako nisu ograničene propisima, u nekim slučajevima nastojimo ih suzbijati. Problemi zbog visokog nivoa VF smetnji mogu nastati npr. kod ispitivanja izolacije kabela, jer VF smetnje unose u mjerenje sistematsku pogrešku.

Konduktivne RF smetnje su najkritičnije u nižem frekventnom području (do 6 MHz). Iznad 30 MHz

* C. I. S. P. R. — Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques



Sl. 1. Frekvencijska ovisnost napona nesimetričnih konduktivnih smetnji uredaja i postrojenja energetske elektronike: a) VF smetnje i b) RF smetnje

konduktivne RF smetnje obično ne promatramo, jer napon smetnji nije skoro nikada veći od 100 μV .

ZAHTJEVI I PROBLEMI KOD PROJEKTIRANJA VF I RF FILTERA

Osnovni kriteriji kod projektiranja filtera za otklanjanje VF i RF smetnji su slijedeći:

- uneseno gušenje a_n^* dovoljno veliko iznad granične frekvencije,
- pad napona U_L nazivne frekvencije na serijskoj grani filtera manji od dozvoljene vrijednosti (npr. manji od 5% nazivnog napona [L. 1]),
- reaktivna struja I_C kroz paralelne grane filtera manja od dozvoljene vrijednosti (ovisi o primjeni filtera).

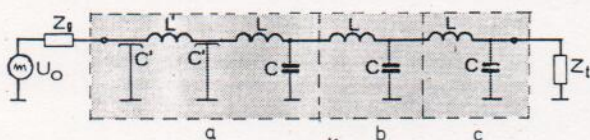
Postoji niz problema kod projektiranja i izrade filtera za suzbijanje VF i RF smetnji, a koje naročito dolaze do izražaja kod projektiranja linijskih filtera velikih nazivnih struja. Problemi su:

- teška predvidivost uvjeta opterećenja pod kojima će filter raditi,
- zasićenje jezgre prigušnice,
- zagrijavanje filtera,
- dimenzije filtera.

OSNOVNA ELEKTRIČNA SHEMA FILTERA

Osnovnu električnu shemu filtera prikazuje slika 2. Filter je kaskadnog tipa, a sastoji se od tri modularne jedinice: glavna jedinica (a), dodatna jedinica I (b) i dodatna jedinica II (c).

Svaka jedinica je konstruktivno samostalna, a ovisno o tome koliko želimo uneseno gušenje može



Sl. 2. Osnovna električna shema filterske kaskade

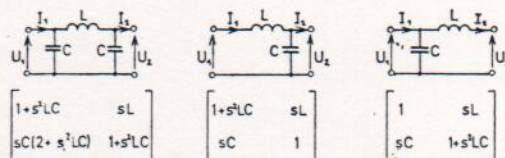
* Uneseno gušenje jest logaritamski odnos između snage koju izvor predaje teretu, dok filter nije uključen u liniju, prema snazi koju izvor predaje teretu, nakon što uključimo filter u liniju između izvora i tereta.

se koristiti ili samo glavna jedinica ili kombinacija glavne jedinice i dodatnih jedinica.

UNESENO GUŠENJE FILTERA

Radi jednostavnijeg proračuna unesenog gušenja filterske kaskade, kaskada je rastavljena na niz elementarnih filtera π i L tipa. Svojstva svakog elementarnog filtera izražavaju se prijenosnim parametrima. Prijenosne parametre elementarnog filtera definira slijedeća matricna jednadžba

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



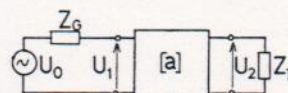
Sl. 3. Prijenosni parametri elementarnih filtera ($s = j\omega$)

Matrice prijenosnih parametara elementarnih filtera daje slika 3. Prijenosni parametri filterske kaskade dobiju se množenjem matrica prijenosnih parametara pojedinih elementarnih filtera, pazeći da se matrice množe istim redoslijedom kako su filteri spojeni u kaskadu u smjeru prenošenja signala

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^I & a_{12}^I \\ a_{21}^I & a_{22}^I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11}^{II} & a_{12}^{II} \\ a_{21}^{II} & a_{22}^{II} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} a_{11}^N & a_{12}^N \\ a_{21}^N & a_{22}^N \end{bmatrix} \quad (2)$$

Uneseno gušenje definira jednadžba (v. sl. 4)

$$a_u = 20 \log \cdot \left| \frac{U_0}{U_2} \cdot \frac{Z_T}{Z_G + Z_T} \right| \quad (3)$$



Sl. 4. K definiciji unesenog gušenja (v. formulu (3))

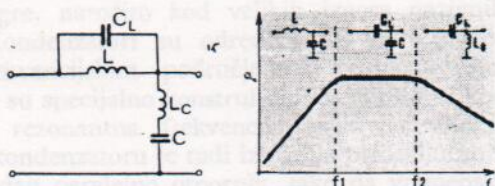
Uneseno gušenje izraženo preko prijenosnih parametara glasi

$$a_u = 20 \log \cdot \left| \frac{a_{11} Z_T + a_{12} + a_{21} Z_T Z_G + a_{22} Z_G}{Z_G + Z_T} \right| \quad (4)$$

Sada se postavlja pitanje do kojih frekvencija možemo računati pretpostavljajući idealne komponente filtera. Slika 5. prikazuje nadomjesnu shemu i krivulju unesenog gušenja filtera L tipa kod kojeg su uzeti u obzir najizrazitiji parazitni efekti.

U filteru se koriste prigušnice s malim parazitnim kapacitetom i kondenzatori visoke rezonantne frekvencije, pa se frekvencija f_1 kreće između 2 MHz i 5 MHz. Krivulja unesenog gušenja iznad frekvencije 1 MHz daleko prelazi vrijednosti od 150 dB/ μV ,

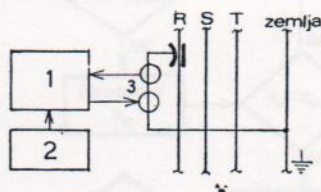
što je i više nego dovoljno za gušenje RF smetnji. Zato nam je kod sinteze i analize filtera najzanimljivije područje ispod frekvencije 1 MHz, gdje model s pretpostavljenim idealnim komponentama zadovoljava.



Sl. 5. Nadomjesna shema filtera L-tipa i frekvencijska ovisnost njegovog unesenog gušenja

Prema jednadžbi (4) vidi se da je za proračun unesenog gušenja potrebno također poznavati impedanciju izvora smetnji Z_G i opteretnu impedanciju filtera Z_T . Filter se priključuje na ulaz i/ili izlaz uređaja energetske elektronike, koji je izvor smetnji. Zbog toga je impedancija izvora smetnji Z_G ulazna ili izlazna impedancija uređaja energetske elektronike. Te impedancije su frekvencijski promjenljive i mijenjaju se od uređaja do uređaja [L. 2]. Na primjer, kod reguliranih ispravljača modul ulazne impedancije se kreće između 0,1 i 10 ohma [L. 3, 4]. Ako se filter nalazi na ulazu uređaja energetske elektronike, opterećenje filtera Z_T je mreža za napajanje uređaja (na primjer 220 V mreža, akumulatorska baterija itd.). Ukoliko filtriramo izlaz uređaja energetske elektronike, opterećenje filtera je potrošač kojeg napaja uređaj energetske elektronike (na primjer elektroničko računalo, PTT sistem itd). Modul impedancije 220 V mreže se kreće od 1 ohma do 400 ohma, a impedancija je induktivnog karaktera [L. 5, 6].

Postoji više metoda mjerenja RF impedancije. Jedan način mjerenja impedancije mreže prikazuje slika 6. [L. 7]. Na isti način se može mjeriti ulazna ili izlazna RF impedancija uređaja energetske elektronike, samo što se uređaj mora napajati preko nisko-propusnog filtera.



Sl. 6. Način mjerenja RF impedancije mreže. 1 — Mjerni prijemnik SOLAR 6863—1, 2 — Signal generator, 3 — Strujne sonde

Kod projektiranja serijskog niza filtera različite primjene, teško je predvidjeti u kakvim sve uvjetima filter može raditi i koliko će biti impedancije Z_G i Z_T . Zato filter treba projektirati za najgori mogući slučaj, tj. za granične vrijednosti. Z_G i Z_T . Uvodimo faktore neprilagođenja

$$\delta_1 = \frac{Z_G}{Z_{01}}, \quad \delta_2 = \frac{Z_T}{Z_{02}}, \quad \delta_{12} = \frac{Z_T}{Z_G}$$

Z_{01} i Z_{02} su karakteristične impedancije filtera.

$$Z_{01} = \sqrt{\frac{a_{11} a_{12}}{a_{21} a_{22}}} \quad \text{i} \quad Z_{02} = \sqrt{\frac{a_{22} a_{12}}{a_{21} a_{11}}}$$

Postoje 4 ekstremna slučaja neprilagođenja filtera:

- | | | |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| a) $Z_G \rightarrow 0$ | $Z_T \rightarrow 0$ | } parno neprilagođenje |
| b) $Z_G \rightarrow \infty$ | $Z_T \rightarrow \infty$ | |
| c) $Z_G \rightarrow 0$ | $Z_T \rightarrow \infty$ | } neparno neprilagođenje |
| d) $Z_G \rightarrow \infty$ | $Z_T \rightarrow 0$ | |

Ne znači da Z_G ili Z_T moraju stvarno biti nula, odnosno da teže u beskonačnost. Situacija da $Z_G \rightarrow 0$ ili $Z_T \rightarrow 0$ će već biti ispunjena ukoliko $\delta_1 < 0,1$ ili $\delta_2 < 0,1$. Slučaju $Z_G \rightarrow \infty$ ili $Z_T \rightarrow \infty$ već se dosta dobro približujemo ukoliko je $\delta_1 > 10$ ili $\delta_2 > 10$. Uneseno gušenje kod ekstremnih slučajeva neprilagođenja filtera daje tablica 1.

Tablica 1.

Uneseno gušenje kod ekstremnih slučajeva neprilagođenja filtera

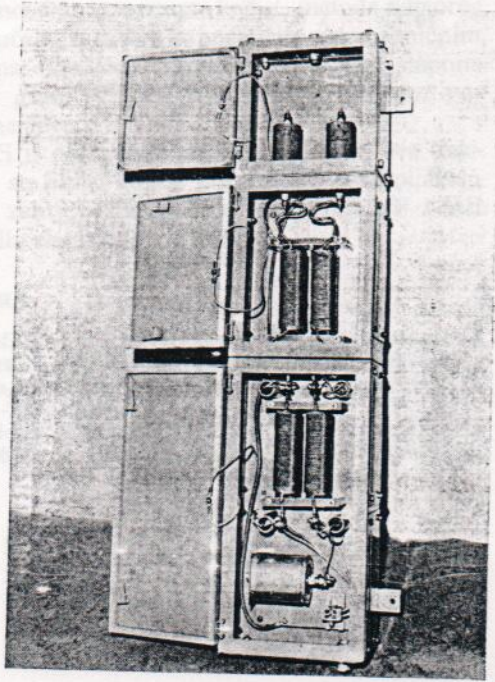
x	Z_G		$a_u = 20 \log x $
	0	∞	
Z_T	0	$\frac{a_{12}}{0}$	a_{11}
	∞	a_{22}	$\frac{a_{21}}{\infty}$

Iz izraza za uneseno gušenje kod ekstremnih slučajeva neprilagođenja filtera, možemo uočiti još jedan problem koji se može javiti kod neparnog neprilagođenja. Kod svih filtera, osim kod najjednostavnijih svaki prijenosni parametar a_{mn} ima nul točke. Kod neparnog neprilagođenja na frekvencijama nultočaka javlja se negativno uneseno gušenje ($\log 0 = -\infty$), odnosno uneseno pojačanje. Kod parnog neprilagođenja, iako su a_{12} i a_{21} nula, x nikada ne može biti nula, odnosno uneseno pojačanje se ne može pojaviti, već imamo samo propade na krivulji unesenog gušenja. Frekvencije na kojima se nalaze propadi su ispod 150 kHz, pa se o toj pojavi treba voditi računa samo kod projektiranja VF filtera.

SINTEZA FILTERA

Maksimalne vrijednosti induktiviteta prigušnica i kapaciteta kondenzatora određuju zahtjevi za pad napona na serijskoj grani filtera U_L i iznos struje kroz paralelne grane I_C .

Stvarne vrijednosti komponenti se ne mogu izračunavati uobičajenim filterskim sintezama [L. 8]. Osnovna pretpostavka kako Zabelove zrcalno parametarske metode, tako i Norton/Bennettove polinomalne metode proračuna parametara komponenata filtera je prilagođenje filtera. Kod VF i RF filtera za suzbijanje električnih smetnji, prilagođenje filtera skoro nikada nije ispunjeni. Zbog toga smo kod proračuna vrijednosti komponenata uzimali u obzir razne uvjete neprilagođenja u kojima bi filter mogao raditi. U radu je korišteno elektroničko računalo.

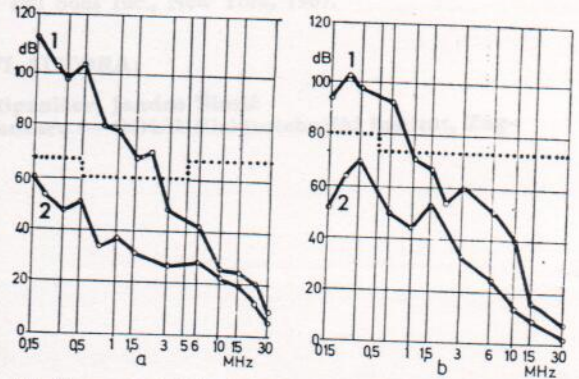


Sl. 11. Fotografija jednofaznog filtera nazivne struje 100 A

sklopu) prije i nakon ugradnje filtera. Korištena je samo glavna jedinica.

ZAKLJUČAK

Kod projektiranja filtera za suzbijanje konduktivnih VF i RF smetnji impedancija izvora i impedancija terata najčešće nije poznata. Zbog toga se kod tra-



Sl. 12. Napon konduktivnih RF smetnji: iz stabilizatora napona i frekvencije 1) prije ugradnje filtera 2) nakon ugradnje filtera a) na ulazu i b) izlazu

Tablica 2.

Tehničke karakteristike filtera

NAZIVNA STRUJA (A)	NAZIVNI NAPON (V)	KAPACITET PO VODU μF		PAD NAPONA PO VODU (V) (za 50 Hz)		UNESENO GUŠENJE ZA GLAVNU JEDINICU + DODATNA JEDINICU I ($Z_G = Z_T = 50$)			
		Glavna jedinica	Dodatna jedinica I	Glavna jedinica	Dodatna jedinica I	40 dB	60 dB	80 dB	100 dB
10	380/220	2,3	2,2	2,2	2,2	23 kHz	36 kHz	54 kHz	95 kHz
25	380/220	2,3	2,2	1,9	1,9	27 kHz	41 kHz	63 kHz	95 kHz
40	380/220	4,2	2,2	2,6	2,6	18 kHz	24 kHz	36 kHz	63 kHz
75	380/220	4,2	2,2	3,5	3,5	20 kHz	27 kHz	41 kHz	72 kHz
100	380/220	4,2	2,2	3,2	3,2	23 kHz	31 kHz	47 kHz	83 kHz
160	380/220	6,2	2,2	5,4	5,4	22 kHz	31 kHz	47 kHz	83 kHz
250	380/220	6,2	2,2	5,4	5,4	27 kHz	36 kHz	54 kHz	95 kHz
315	380/220	6,2	2,2	5,4	5,4	31 kHz	41 kHz	63 kHz	109 kHz
400	380/220	6,2	2,2	5,1	5,0	36 kHz	47 kHz	72 kHz	115 kHz
630	380/220	8,2	2,2	5,5	5,3	40 kHz	53 kHz	80 kHz	125 kHz