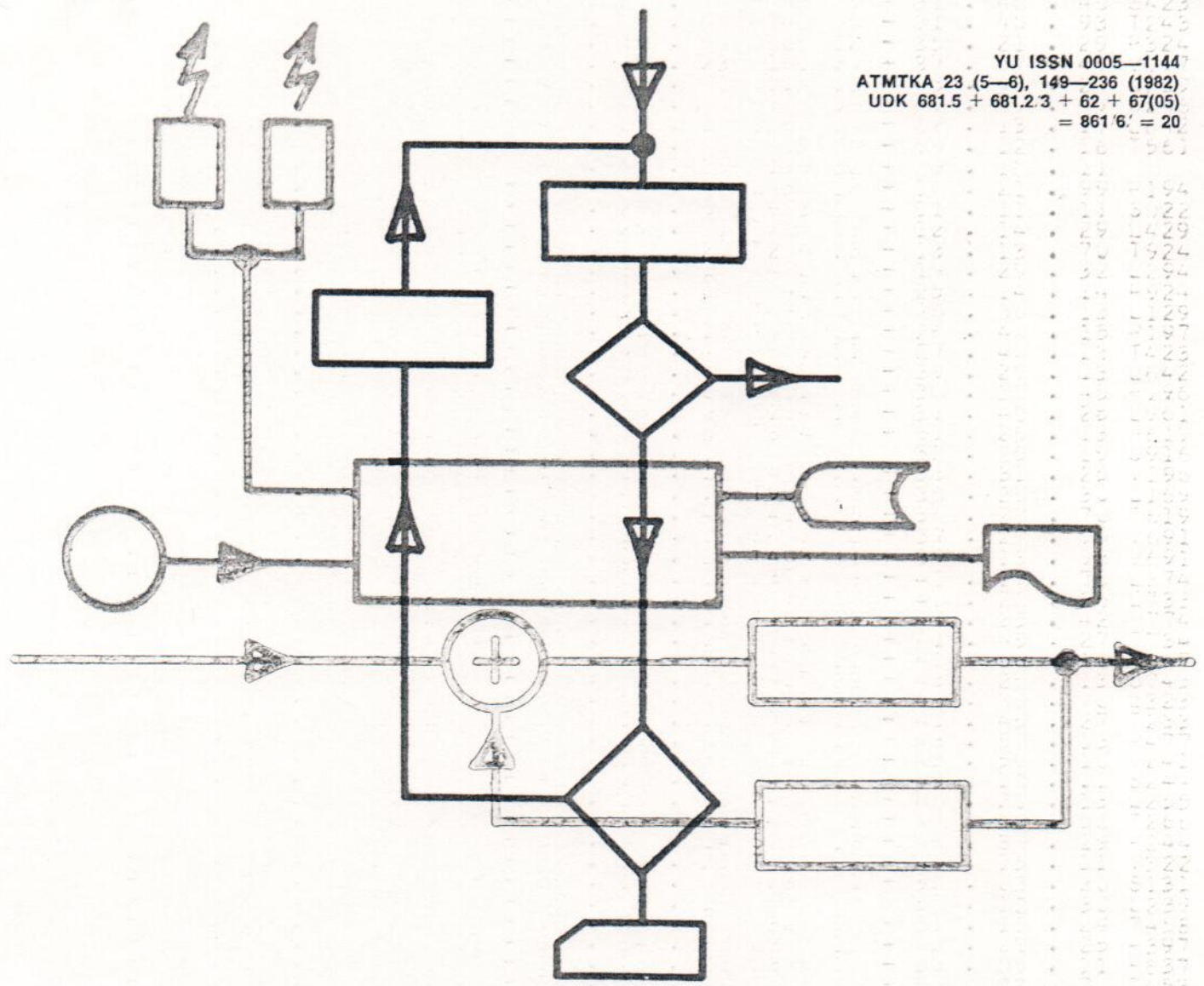


1,4,3

YU ISSN 0005—1144
ATMTKA 23 (5—6), 149—236 (1982)
UDK 681.5 + 681.2.3, + 62 + 67(05)
= 861'6' = 20



jugoslavenski časopis za automatizaciju i informatiku
automatika god. 23 zagreb, septembar — decembar 1982, broj 5—6 str. 149—236

automatika

5-6/1982 GODINA 23

Časopis izdaje Jugoslavenski savez za ETAN

Casopis 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

OSNIVACI

Energoinvest, poduzeće za projektovanje i izgradnju energetskih i industrijskih postrojenja, Sarajevo — Združeno podjetje 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 energetiku, 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. Ludvik Gyergyek, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana; prof. dr. Berislav Jurković, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; dr. Nenad Marinović, Elektrotehnički institut »R. Končar«, Zagreb; prof. dr. Vladimir Muljević, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; Jovo Pavlović, Jugoslavenski savez za ETAN, Beograd; dr. Slobodan Radoman, Institut »M. Pupin«, Beograd; dr. Bruno Rusjan, Iskra, Elektromehanika TOZD TTS, Ljubljana; prof. dr. Asif Šabanović, Energoinvest IRCA, Sarajevo; dr. Bruno Stiglic, Iskra, Industrija za avtomatiko, Ljubljana; prof. dr. Tugomir Šurina, 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 Ciner, Tehnička vojna akademija, Zagreb; prof. dr. Milan Calović, Elektrotehnički fakultet, Beograd; mr. Fikret Cejvan, 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. Bijedića«, 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 elektrotehniko, Ljubljana; prof. dr. Nedža Pašalić, Elektrotehnički fakultet, Zagreb; prof. dr. Borivoje Rajković, Elektrotehnički institut »R. Končar«, Zagreb; Branko Robavs, Iskra, Industrija za avtomatiko, Ljubljana; prof. dr. Milić Stojić, Elektrotehnički fakultet, Beograd; Anton Stuček, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana; prof. dr. Pane Vidinčev, Elektrotehnički fakultet, Skopje; prof. dr. Miomir Vukobratović, Institut »M. Pupin«, Beograd; dr. Anton Zeleznikar, Elektrotehna-Delta, Razvoj software, Ljubljana;

UZI UREDNIČKI KOLEGIJ

Jože Černelc, Vladimir Matijević, dr. Nedža 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. 3, 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 preplata za pravne osobe 1000 dinara — za inozemstvo 50 dolara USA — za pojedince 200 dinara — za studente 100 dinara. Pojedini broj izvan preplate: za pravne osobe 200 dinara, za pojedince 50 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 »Automatika«).

Tisak: GRAFIČKI ZAVOD HRVATSKE — ZAGREB

UREDNIČKI ODBOR BEOGRAD

Dr. Vukašin Masnikosa, dr. Sanoje Bingulac, dr. Milan Calović, 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 Cajhen, dr. Ferdo Gubina, Alojz Hussu, Matija Seliger, Stane Slapšak, Jure Tasić, Miha Tomšič, Dimitrij Uran

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Anton Ogorelec, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 61000 Ljubljana

UREDNIČKI ODBOR MARIBOR

Bruno Stiglic, Igor Kapus, Ivan Lešnik, Bogdan Naprudnik, Anton Travan

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke Bruno Stiglic Kamnička 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. Emir 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 Gruevski, Todor Jakimov, Milčo Kocarev

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

UREDNIČKI ODBOR SPLIT

Dr. Petar Guglić, dr. Milojko Čišić, dr. Petar Slapničar, mr. Ratko Zanetić, Stanko Mimica

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke dr. Petar Guglić, Elektrotehnički fakultet, R. Boškovića b. b., 51000 Split

UREDNIČKI ODBOR ZAGREB

Vladimir Matijević, dr. Ramiz Abdul, mr. Zvonko Benčić, dr. Leo Budin, mr. Muamer Hamidović, mr. Marica Jurišić-Zec, dr. Božidar Vojnović, Predrag Vranić, Ivo Zgombić

Naslov uredničkog odbora časopisa Automatika, na ruke Vladimir Matijević, INEM, SOUR »R. Končar«, Baštijanova 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 broja 7. stava 2. Tarife posebnog republičkog poreza na promet proizvoda, za koje se ne plaća porez na promet proizvoda.

Uređenje zaključeno: 15. 11. 1983.

automatika

JUGOSLAVENSKI ČASOPIS ZA AUTOMATIZACIJU I INFORMATIKU

YU ISSN 0005-1144
ATMTKA 23 (5-6), 149-236 (1982)
UDK 681.5 + 681.2/3 + 62 + 67(95) = 861/6/ = 20

Godina 23—1982.

Broj

5-6

SADRŽAJ

- | | | |
|--|-----|---|
| Vladimir S. Batalov | 151 | Određivanje modela sistema neminimalne faze
<i>referat s naučnog skupa</i> |
| Nedžad Pašalić
Nevio Bugarin | 157 | Simulacija istosmjernog elektromotornog pogona napajanog iz tranzistor-
skog čopera
<i>originalni naučni članak</i> |
| Martin Jađrić
Ljubomir Božiković | 163 | Dinamika elektromotornog pogona s asinhronim motorom i izmjeničnim
momentom opterećenja
<i>originalni naučni članak</i> |
| S. Strmčnik,
D. Matko, F. Bremšak,
J. Černetić | 171 | Nov pristop k poenostavljanju modelov vodovodnih sistemov
<i>originalni znanstveni članek</i> |
| Zoran Bugarinović,
Srđan Stanković | 181 | Samopodešavajući regulatori sa eksplicitnom i implicitnom identifi-
kacijom
<i>originalni naučni članak</i> |
| Darko Stipaničev | 189 | Proračun stupnja elektromagnetske kompatibilnosti elektroničkih sklo-
pova, uređaja i sistema
<i>originalni naučni članak</i> |
| Bruno Rusjan | 197 | Električno modeliranje farmakoloških pojava
<i>prethodno saopćenje</i> |
| Vukašin P. Masnikosa | 205 | Primena principa dejstva u rasčlanjavanju toka proizvodnje
<i>originalni naučni članak</i> |
| Miroslav Miličević | 211 | Automatizacija uređaja za odsecanje profila u pokretu primenom
mikroračunara
<i>stručni članak</i> |
| | 217 | Naši autori |
| | 222 | Referati |
| | 227 | Savjetovanja i priredbe |
| | 232 | Automatizacija u riječi i slici |

Darko Stipančić

Proračun stupnja elektromagnetske kompatibilnosti elektroničkih sklopova, uređaja i sistema*

UDK 621.391.823.001.3
IFAC IA 4.0.1.2

Originalni naučni članak

Proračunom stupnja elektromagnetske kompatibilnosti moguće je još u fazi razvoja i projekta predvidjeti i kvantitativno vrednovati elektromagnetsku kompatibilnost sklopova, uređaja i sistema. U članku je prikazan proračun stupnja elektromagnetske kompatibilnosti ukoliko se osjetljivost na smetnje sklopova, uređaja i sistema može prikazati srednjom snagom signala smetnje. Na kraju su dani rezultati eksperimentalne provjere teorijskih zaključaka na okidnom uređaju za upravljanje tiristorima u trofaznom mosnom spoju.

How to Calculate the Figure of Merite of EMC of Electronic Circuits, Devices and Systems.
The optimal solution of electromagnetic compatibility problems (EMC problems) can be obtained only if we calculate the figure of merite of EMC of circuits, devices and systems. This paper deals with the calculation of the figure of merite of EMC in the cases when the receptor's susceptibility can be characterized in terms of average power. In the end the theoretical results are verified experimentally on the trigger device for three-pulse bridge converter.

1. UVOD

Ako u određenom sklopu, uređaju ili sistemu nije postignuta elektromagnetska kompatibilnost (elektromagnetski sklad) između pojedinih sastavnih dijelova kažemo da se pojavio **problem elektromagnetske kompatibilnosti**.

Problemi elektromagnetske kompatibilnosti se mogu riješiti na zadovoljavajući način ako se o elektromagnetskoj kompatibilnosti vodi računa tokom svih faza razvoja i projekta sklopova, uređaja i sistema. Proračunom stupnja elektromagnetske kompatibilnosti moguće je još u fazi razvoja ustanoviti, ne samo da li će se pojaviti određeni problemi elektromagnetske kompatibilnosti, već i u kojoj mjeri će ti problemi biti izraženi. Optimiranje sklopova, uređaja ili sistema, kako s ekonomskog, tako i s tehničkog aspekta, moguće je izvršiti jedino ukoliko se problemima elektromagnetske kompatibilnosti pristupa na kvantitativnoj osnovi koristeći metode kvantitativnog predviđanja elektromagnetske kompatibilnosti [1]. Velika prednost metoda kvantitativnog predviđanja je njihova fleksibilnost, na jednostavan način mogu se tokom faze razvoja i projekta unositi promjene i brzo uočavati moguća poboljšanja ili pogoršanja izazvana tim promjenama.

2. DEFINIRANJE I PRORAČUN STUPNJA ELEKTROMAGNETSKE KOMPATIBILNOSTI

Stupanj elektromagnetske kompatibilnosti je mjera elektromagnetske kompatibilnosti. Ovisi o karak-

teristikama izvora smetnji, o karakteristikama prijemnika smetnji* i o karakteristikama prijenosnog puta smetnji.

Karakteristike i -tog izvora smetnji opisujemo **funkcijom izvora** $G_{ij}(f)$. To je spektar signala smetnje na njegovom j -tom izlazu.

Karakteristike i -tog prijemnika smetnji opisujemo **funkcijom osjetljivosti** na smetnje O_{ij} . To je maksimalno dopuštena veličina signala smetnje na j -tom ulazu i -tog prijemnika smetnji. Prijemnike smetnji s obzirom na funkciju osjetljivosti možemo podijeliti u tri grupe:

- prijemnici čija funkcija osjetljivosti O_{ij} ovisi o srednjoj snazi signala smetnje,
- prijemnici čija funkcija osjetljivosti O_{ij} ovisi o amplitudi napona ili struje sinusnih komponenata signala smetnje i
- prijemnici čija funkcija osjetljivosti ovisi na druge načine o signalu smetnji, primjerice brzini porasta prednjeg brida signala smetnje, trajanja signala smetnje i sl.

Karakteristike i -tog prijenosnog puta smetnji opisujemo **funkcijom prijenosa** $T_i(f)$. To je pojačanje, odnosno prigušenje sinusnih komponenata signala smetnje na i -tom putu od izvora smetnji do prijemnika smetnji.

Kod većine elektroničkih i električkih uređaja koji se danas koriste, a posebno kod elektroničkih

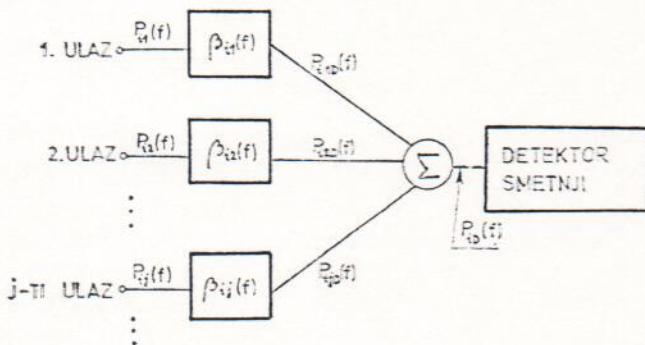
* Ovaj članak je nastao za vrijeme autorovog rada u Elektrotehničkom institutu „Rade Končar“ u Zagrebu.

* Zbog kraćeg izražavanja, sklop, uređaj ili sistem do kojeg dolazi signal smetnje nazvati ćemo »prijemnik smetnji«.

uređaja i komunikacijskih sistema koji rade s analognim signalima, funkcija osjetljivosti se može prikazati srednjom snagom signala smetnje [2], pa ćemo se u daljnjem tekstu baviti samo s tom grupom prijemnika smetnji.

2.1. Stupanj elektromagnetske kompatibilnosti jednog ulaza prijemnika smetnji

Sa stajališta elektromagnetske kompatibilnosti prijemnik smetnji, čija funkcija osjetljivosti ovisi o srednjoj snazi signala smetnje, može se smatrati sastavljenim od dva međusobno serijski spojena dijela slika 1. Prvi dio, na čije ulaze dolazi neželjeni signal smetnje je prijenosni dio koji potpuno određuje frekvencijsku karakteristiku prijemnika svojom prijenosnom karakteristikom $\beta_i(f)$. Drugi dio je frekvencijski neselektivni detektor koji je osjetljiv na srednju snagu signala smetnje koja dođe do njega. Pretpostavljamo da je prijenosni dio linearan i da su sve nelinearnosti uključene u detektor.



Sl. 1. Prijemnik smetnji s više ulaza smetnji

Funkciju osjetljivosti O_{ij} j -tog ulaza i -tog prijemnika smetnji definiramo kvocijentom maksimalno dopuštene srednje snage signala smetnje \hat{N}_i koja može doći na detektor i prijenosne karakteristike $\beta_{ij}(f)$ j -tog ulaza

$$O_{ij}(f) = \hat{N}_i / \beta_{ij}(f) \quad (1)$$

U općem slučaju $\beta_{ij}(f)$ su različiti za različite ulaze, pa će svaki ulaz imati drugačiju funkciju osjetljivosti.

Pretpostavimo da je spektar signala smetnje na j -tom ulazu našeg i -tog prijemnika $P_{ij}(f)$. Nakon prolaska prijenosnog dijela na detektor dolazi srednja snaga signala smetnje

$$\bar{P}_{iD} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{iD}(f) df = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{ij}(f) \beta_{ij}(f) df \quad (2)$$

Sada možemo definirati stupanj elektromagnetske kompatibilnosti j -tog ulaza i -tog prijemnika smetnji kao kvocijent srednje snage koja je došla do detek-

tora \bar{P}_{iD} i maksimalno dopuštene srednje snage signala smetnje \hat{N}_i

$$S_{EMCIj} = \bar{P}_{iD} / \hat{N}_i = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{P_{ij}(f)}{O_{ij}(f)} \cdot df \quad (3)$$

2.2. Stupanj elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika smetnji — signali smetnji nisu međusobno koherentni

Kako prijemnik smetnji ima više ulaza pravi pokazatelj elektromagnetske kompatibilnosti je **stupanj elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika**. Prvo ćemo razmotriti proračun stupnja elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika kada signali smetnji nisu međusobno koherentni (signali smetnji nisu međusobno koherentni kada nemaju spektralne komponente na istim frekvencijama).

U ovom slučaju stupanj elektromagnetske kompatibilnosti i -tog prijemnika S_{EMCI} s J ulaza se dobije zbrajanjem stupnjeva elektromagnetske kompatibilnosti pojedinih ulaza

$$S_{EMCI} = \sum_{j=1}^J S_{EMCIj} \quad (4)$$

odnosno logaritamski u decibelima

$$S_{EMCI}^{dB} = 10 \log S_{EMCI} \quad (5)$$

Prijemnik će biti smetan tj. pojaviti će se problem elektromagnetske kompatibilnosti, ako je stupanj elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika veći od jedan ($S_{EMCI} > 1$), odnosno ako je izražen logaritamski veći od 0 dB ($S_{EMCI}^{dB} > 0$).

2.3. Stupanj elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika smetnji — signali smetnji su međusobno koherentni

U ovom slučaju za točan proračun stupnja elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika treba osim spektra amplituda poznavati i spektar faza. Međutim kako faze najčešće nisu poznate, stupanj elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika računamo metodom najgoreg mogućeg slučaja, odnosno pretpostavljamo da su fazni odnosi spektralnih komponenti koje se preklapaju najnepovoljniji. Tako proračunat stupanj elektromagnetske kompatibilnosti neće nikad biti premašen.

Nakon prolaza signala smetnje kroz prijenosni dio prijemnika s J ulaza na detektor smetnji dolazi J spektara snage pojedinih ulaza $P_{iDj}(f)$. Ukupna srednja snaga signala smetnji koja dođe na detektor iznosi $\bar{P}_{iD} = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{iD}(f) \cdot df$. Dakle, trebamo odrediti spektar snage nakon sumacije $P_{iD}(f)$. U vremenskoj domeni spektru snage $P_{iD}(f)$ prema teoremu Wiener-

Khinchin-a odgovara autokorelacijska funkcija $R_{iD}(\tau)$ [3, 4]

$$R_{iD}(\tau) = \sum_{j=1}^J R_{iDj}(\tau) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^J R_{iDj,kD}(\tau) \quad k \neq j \quad (6)$$

gdje je

$R_{iDj}(\tau)$ inverzna Fourierova transformacija spektra snage $P_{iDj}(f)$
 $R_{iDj,kD}(\tau)$ križna korelacijska funkcija
 Gornja meda križne korelacijske funkcije je [3]

$$R_{iDj,kD}(\tau) \leq \frac{1}{2} [R_{iDj}(0) + R_{iDk}(0)] \quad (7)$$

Nakon uvrštavanja u (6) i sređivanja dobijemo da $R_{iD}(\tau)$ maksimalno iznosi

$$\hat{R}_{iD}(\tau) = \sum_{j=1}^J R_{iDj}(\tau) - (J-1) \sum_{j=1}^J R_{iDj}(0) \quad (8)$$

U frekvencijskoj domeni funkciji $\hat{R}_{iD}(\tau)$ odgovara maksimalna vrijednost spektra snage $\hat{P}_{iD}(f)$

$$\hat{P}_{iD}(f) = \sum_{j=1}^J P_{iDj}(f) + (J-1) \sum_{j=1}^J R_{iDj}(0) \cdot \delta(f) \quad (9)$$

Nakon integracije dobijemo maksimalnu srednju snagu koja može doći na detektor

$$\hat{P}_{iD} = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{P}_{iD}(f) df = \sum_{j=1}^J \int_{-\infty}^{+\infty} P_{iDj}(f) df + (J-1) \sum_{j=1}^J R_{iDj}(0) \cdot 1 \quad (10)$$

Prema teoremu o energijama Fourierove transformacije vrijedi

$$R_{iDj}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{iDj}(f) \cdot df \quad (11)$$

pa je prema tome

$$\hat{P}_{iD} = J \cdot \sum_{j=1}^J \int_{-\infty}^{+\infty} P_{iDj}(f) \cdot df \quad (12)$$

Iz (3), (4) i (12) slijedi maksimalno mogući stupanj elektromagnetske kompatibilnosti i -tog prijemnika s J ulaza

$$\hat{S}_{EMCi} = J \cdot \sum_{j=1}^J S_{EMCij} \quad (13)$$

2.4. Stupanj elektromagnetske kompatibilnosti sistema koji ima više prijemnika smetnji

Složeni uređaj ili sistem može imati više prijemnika smetnji, pa tako dolazimo do problema proračuna stupnja elektromagnetske kompatibilnosti sistema S_{EMC} .

Sistem nije kompatibilan unutar sebe ukoliko je bar jedan od stupnjeva elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika veći od jedan ($S_{EMCi} > 1$) ili logaritamski izražen veći od 0 dB ($S_{EMCi} > 0$). Kod proračuna stupnja elektromagnetske kompatibilnosti sistema problema je kako ga povezati sa stupnjevima elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika. Jedan od načina je jednadžba

$$S_{EMC} = S_{EMC1}^+ \cdot S_{EMC2}^+ \dots S_{EMCi}^+ \dots = \prod_i S_{EMCi}^+ \quad (14)$$

gdje je

$$S_{EMCi}^+ = 1 \text{ ako je } S_{EMCi} \leq 1$$

$$S_{EMCi}^+ = S_{EMCi} \text{ ako je } S_{EMCi} > 1$$

Jednadžbu (14) možemo pisati i logaritamski koristeći logaritamske stupnjeve elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika S_{EMCi}^{dB} i to samo one koji su veći od nule

$$S_{EMC}^{dB} = \sum_i S_{EMCi}^{dB} \text{ uz } S_{EMCi}^{dB} > 0 \quad (15)$$

To je najpessimističniji način definiranja ukupnog stupnja elektromagnetske kompatibilnosti sistema S_{EMC} .

Realnim situacijama je bliže određivati S_{EMC} metodom ponderiranja.

$$S_{EMC}^{dB} = \sum_i p(\Delta t_i) \cdot \xi_i \cdot S_{EMCi}^{dB}; \quad p(\Delta t_i) \in [0, 1]; \quad \xi_i \in [0, 1] \quad (16)$$

U jednadžbi (16) uzimaju se samo oni logaritamski stupnjevi elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika S_{EMCi}^{dB} koji su veći od nule ($S_{EMCi}^{dB} > 0$). ξ_i je faktor ponderiranja, odnosno numerički pokazatelj koji pripada zatvorenom intervalu $[0, 1]$ i koji pokazuje u kojoj mjeri pojedini prijemnici smetnji pridonose ukupnoj funkcionalnosti analiziranog sistema. Naime, sve komponente nisu podjednako važne i nemaju jednak utjecaj na funkciju koju sistem treba vršiti. Proces pridjeljivanja faktora ξ_i pojedinim komponentama sistema je subjektivni proces. Međutim, koristeći metode i tehnike kolektivnog procjenjivanja i usklađivanja mišljenja moguće je smanjiti subjektivnost. $p(\Delta t_i)$ je vjerojatnost rada i -tog prijemnika u ukupnom vremenu rada analiziranog sistema. Pojedine komponente sistema ne moraju raditi cijelo vrijeme t u kojem sistem obavlja svoju funkciju. Ako je Δt_i suma svih vre-

mena rada i -tog prijemnika u vremenu t vjerojatnost $p(\Delta t_i)$ izražavamo jednadžbom

$$p(\Delta t_i) = \Delta t_i / t \quad (17)$$

Sistem je kompatibilan unutar sebe, odnosno problem elektromagnetske kompatibilnosti se neće pojaviti ako je stupanj elektromagnetske kompatibilnosti sistema $S_{EMCI}^{dB} \leq 0$.

3. OPTIMALNA INTERVENCIJA KAD NIJE POSTIGNUTA ELEKTROMAGNETSKA KOMPATIBILNOST

Kada elektromagnetska kompatibilnost nije postignuta, potrebno je različitim metodama npr. filtriranjem, oklapanjem, smanjenjem osjetljivosti prijemnika i slično postići $S_{EMCI} = 1$, odnosno zbog razloga sigurnosti malo manje od jedan (npr. 0,3, što približno odgovara -5 dB). Ako nakon intervencije dobijemo $S_{EMCI} \ll 1$, primjenjena metoda je previše drastična i vjerojatno postoji neka umjerenija, a s tim i ekonomski povoljnija metoda.

Kod prijemnika koji ima \mathcal{F} ulaza potrebno je stupnjeve elektromagnetske kompatibilnosti pojedinih ulaza S_{EMCIj} smanjiti za faktor k_j .

U slučaju nekoherentnih izvora smetnji matematički zahtjev za optimalnom intervencijom izražavamo jednadžbom

$$\sum_{j=1}^J k_j S_{EMCIj} = C \quad (18)$$

Konstanta C je malo manja od jedan (tako uzimamo u obzir faktor sigurnosti). Postoji puno rješenja k_j koja zadovoljavaju jednadžbu (18). Uvođenjem dodatnog uvjeta, koji je u datim prilikama optimalno rješenje, dolazimo do jednoznačnog rješenja.

Jedan od najčešćih uvjeta optimizacije je da faktori k_j budu što bliže jedinici, odnosno da se što manje dira u postojeće stanje. Matematički to izražavamo zahtjevom da funkcija

$$z = \sum_{j=1}^J |\ln k_j| \quad (19)$$

bude minimalna [5, 6].

Određivanje konstanti k_j , da zadovolje jednadžbe (18) i (19) predstavlja problem traženja vezanih ekstrema. Metodom Lagrangeovih multiplikatora dobijemo optimalne vrijednosti konstanti k_j

$$k_j = \frac{C}{\mathcal{F} \cdot S_{EMCIj}} \quad (20)$$

U slučaju kad su signali smetnji na ulazima prijemnika smetnji međusobno koherentni na sličan način bi dobili da jednadžbe (18) i (20) glase

$$\mathcal{F} \cdot \sum_{i=1}^J k_j S_{EMCIj} = C \quad (21)$$

$$k_j = \frac{C}{\mathcal{F}^2 \cdot S_{EMCIj}} \quad (22)$$

Ako jednadžba (20) i (22) daje neki $k_j > 1$, taj faktor se izjednači sa jedan, a njemu pripadajući S_{EMCIj} u jednadžbi (18) i (21) se prebaci na desnu stranu. S time je broj nepoznanica reduciran, a proces traženja ostalih konstanti se ponavlja.

Ukoliko se zbog ekonomskih razloga preferira intervencija na nekom od ulaza prijemnika smetnji funkcija z ima drukčiji oblik.

Konstanta k_j određuje kolika mora biti vrijednost novog stupnja elektromagnetske kompatibilnosti $S_{EMCIj}^* = k_j S_{EMCIj}$. Do te nove vrijednosti može se doći na više načina: intervencijom na izvoru smetnji, intervencijom na prijemniku smetnji, intervencijom na prijenosnom putu ili kombinacijom intervencija npr. djelomičnim smanjivanjem osjetljivosti prijemnika smetnji i ubacivanjem filtera u prijenosni put signala smetnji.

4. PRIMJER MJERENJA STUPNJA ELEKTROMAGNETSKE KOMPATIBILNOSTI

U laboratorijskim uvjetima najprije je eksperimentom trebalo ustanoviti da li se osjetljivost na smetnje jednog tipičnog elektroničkog upravljačkog uređaja može izraziti srednjom snagom signala smetnji. Nakon toga se za nekoliko različitih signala smetnji na različitim ulazima u ovaj upravljački uređaj odredilo odstupanje izmjerenih stupnjeva elektromagnetske kompatibilnosti od proračunatih prije navedenim formulama.

Kod izbora signala smetnje ograničili smo se na konduktivne smetnje. Kao prijemnik smetnji uzet je okidni uređaj tip VR2 3413 00R1 proizvodnje BBC za upravljanje tiristorima u trofaznim spojevima. Kod ovog uređaja postoje dva potencijalna ulaza konduktivnih smetnji:

- vodovi za izmjenično napajanje i
- regulacijski vodovi preko kojih se dovodi signal koji određuje fazni položaj okidnih impulsa unutar jedne periode izmjeničnog napona.

Kao pogreška u radu okidnog uređaja pod utjecajem signala smetnje uzet je krivi fazni položaj okidnih impulsa unutar jedne periode izmjeničnog napona. Deklarirana pogreška faznog položaja okidnih impulsa je $\pm 2^\circ$ el, pa je kao indikator pojave smetnji uzet kut pogreške $\epsilon > 2^\circ$ el.

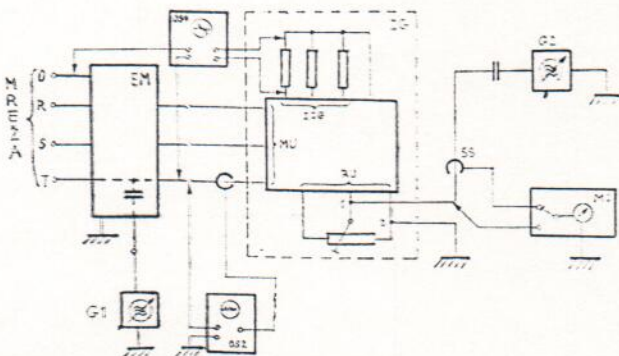
4.1. Mjerenje ovisnosti struje injektiranog signala smetnji o naponu signala smetnji

Prije izvođenja pokusa kojim se željelo utvrditi da li se osjetljivost na smetnje okidnog uređaja može

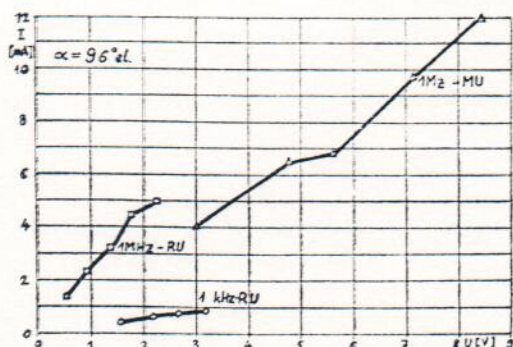
izvaziti srednjom snagom (4.2.), uređaj smetnji

izraziti srednjom snagom signala smetnji (vidi dio 4.2.), trebalo je ustanoviti ovisnost struje injektiranog signala smetnje o naponu signala smetnje na ulazima prijemnika. Ako bi se ustanovila linearna ovisnost napona i struje signala smetnje u svim ostalim pokusima umjesto snage signala smetnje dovoljno bi bilo mjeriti napon (ili struju) signala smetnje.

Blok shema mjerenja, koja će ujedno služiti i u slijedećim pokusima, prikazana je na slici 2. Okidni uređaj se napaja preko ekvivalentne mreže za stabilizaciju impedancije kako bi se otklonio utjecaj već postojećih smetnji u mreži za napajanje. Osciloskopom OS1 mjerimo fazni položaj okidnih impulsa u odnosu na napon mreže (kut upravljanja α i kut pogreške ϵ). Osciloskopom OS2 i mjernim instrumentom MI mjerimo ovisnost struje injektiranog signala smetnji o naponu signala smetnji. Signal generatori G1 i G2 predstavljaju izvore smetnji. Mjerenjem na regulacijskom ulazu je vršeno nezavisno od mjerenja na mrežnom ulazu.



Slika 2. Blok-shema mjerenja osjetljivosti na smetnje okidnog uređaja za upravljanje tiristorima u trofaznim spojevima. IG okidni uređaj; G1, G2 signal-generatori; MU mrežni ulaz; OS1, OS2 osciloskopi; RU regulacijski ulaz; SS strujna sonda; MI izlaz okidnih impulsa; MI instrument za mjerenje napona i struje; EM ekvivalentna mreža za stabilizaciju impedancije



Slika 3. Ovisnost struje injektiranog signala smetnje o naponu signala smetnje. RU — regulacijski ulaz, MU — mrežni ulaz

Slika 3. prikazuje rezultate mjerenja ovisnosti struje injektiranog signala smetnje o naponu signala smetnje na regulacijskom ulazu za frekvencije signala smetnji

1 kHz i 1 MHz, te na mrežnom ulazu u frekvenciju 1 MHz. I na drugim frekvencijama situacija je bila slična [1]. Kut upravljanja α je bio 96° el. Iz slike se vidi da je kod određene frekvencije unutrašnja impedancija regulacijskog i mrežnog ulaza konstantna iznad neke minimalne vrijednosti napona signala smetnje. Ta minimalna vrijednost napona signala smetnje u svim slučajevima odgovara približno kutu pogreške ϵ od $0,4^\circ$ el. Kako se osciloskopom OS1 još može točno procijeniti kut od $0,4^\circ$ el, možemo pretpostaviti konstantnost unutrašnjih impedancija ulaza smetnji u mjernom području od interesa.

Dakle dovoljno je, ukoliko se ustanovi da se osjetljivost na smetnje može izraziti srednjom snagom, mjeriti napon (ili struju) signala smetnje.

4.2. Ispitivanje na koji se način može izraziti osjetljivost na smetnje okidnog uređaja

Do odgovora na pitanje na koji se način može izraziti osjetljivost na smetnje okidnog uređaja može se doći na dva načina:

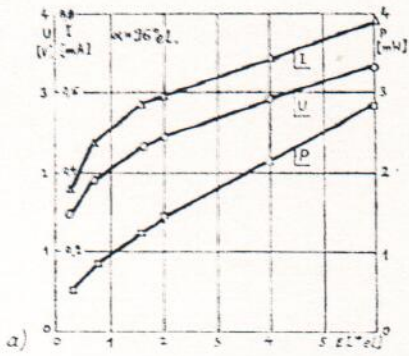
- mjerenjem ovisnosti kuta pogreške o naponu, struji i snazi signala smetnje i
- dovođenjem više nekoherentnih signala smetnji na ulaze okidnog uređaja i promatranjem njihovog superpozicijskog djelovanja.

Slika 4. prikazuje ovisnost kuta pogreške ϵ o naponu, struji i snazi signala smetnje od 10 kHz na regulacijskom ulazu i signala smetnje od 1 MHz na mrežnom ulazu. Slični rezultati dobiju se i na drugim frekvencijama [1]. Iz slike se vidi da za kut pogreške od $0,4^\circ$ el. do 6° el. vrijedi približno $\epsilon \sim P$, $\epsilon \sim U^2$ i $\epsilon \sim I^2$. Iz toga slijedi zaključak da se za veličine kuta pogreške koje su nam od interesa kod određivanja stupnja elektromagnetske kompatibilnosti osjetljivost na smetnje može izraziti pomoću srednje snage signala smetnje.

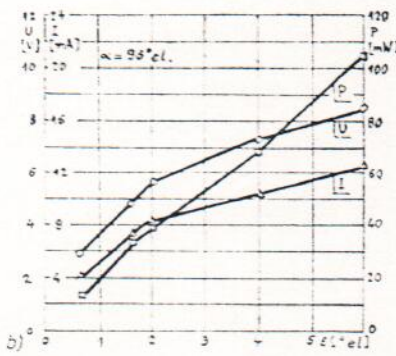
Do istog zaključka doći ćemo i na drugi način. Ako se na različite ulaze okidnog uređaja dovede n nekoherentnih signala smetnji a nivo svakog signala smetnje podesi tako da on sam za sebe daje granični kut pogreške $\epsilon = 2^\circ$ el, tada su istovremenim djelovanjem svih n signala smetnji moguća dva slučaja:

- ukupni kut pogreške iznosi $n \cdot 2^\circ$ el. ili
- ukupni kut pogreške na neki drugi način ovisi o broju signala smetnji (npr. $\sqrt{n} \cdot 2^\circ$ el.).

U prvom slučaju iz jednadžbe (1) i (2), a uzimajući u obzir da svaki izvor daje signal smetnje upravo jednak nivou osjetljivosti na smetnje okidnog uređaja, slijedi zaključak da se osjetljivost na smetnje može izraziti srednjom snagom signala smetnje. U drugom slučaju takav zaključak ne vrijedi. Osjetljivost na smetnje se iskazuje na drugi način. Iz niza pokusa kod kojih su korištene najrazličitije kombinacije uključivanja četiri signal-generatora i najrazličitije frekvencije, uvijek se dobivalo da je kut



a)



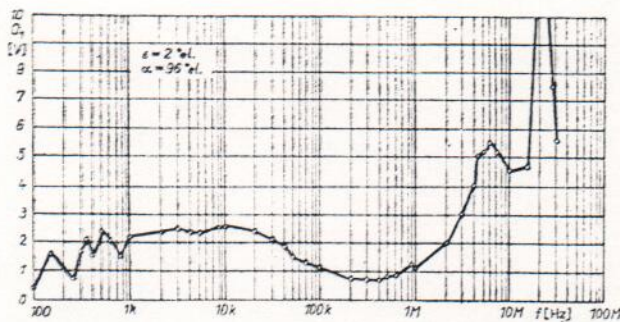
b)

Sl. 4. Ovisnost pogreške faznog položaja okidnog impulsa o naponu, struji i snazi signala smetnje a) na regulacijskom ulazu za frekvencije signala smetnje od 10 kHz i b) na mrežnom ulazu za frekvencije signala smetnje od 1 MHz

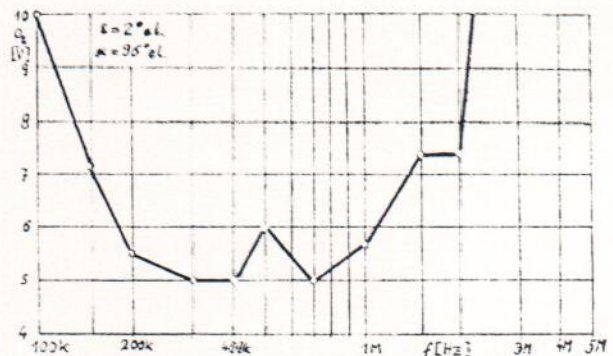
pogreške proporcionalan broju uključenih signal-generatora ($n \cdot 2^\circ \text{el.}$).

4.3. Mjerenje funkcije osjetljivosti

Blok-shemu mjerenja funkcije osjetljivosti prikazuje slika 2. Slika 5 prikazuje funkciju osjetljivosti na smetnje okidnog uređaja na regulacijskom ulazu u frekvencijskom području od 100 Hz do 30 MHz. Slika 6 prikazuje funkciju osjetljivosti okidnog uređaja na mrežnom ulazu u frekvencijskom području od 100 kHz do 2 MHz.



Sl. 5. Funkcija osjetljivosti na smetnje okidnog uređaja na regulacijskom ulazu u frekvencijskom području od 100 Hz do 30 MHz



Sl. 6. Funkcija osjetljivosti okidnog uređaja na mrežnom ulazu u frekvencijskom području od 100 kHz do 2 MHz

4.4. Određivanje stupnja elektromagnetske kompatibilnosti

Izvršeno je ukupno 20 pokusa sa slijedećim kombinacijama izvora smetnji (signal-generatora):

- a) na regulacijskom ulazu dva generatora sinusnog signala smetnje,
- b) na regulacijskom ulazu jedan, a na mrežnom drugi generator sinusnog signala smetnje,
- c) na regulacijskom ulazu dva, a na mrežnom ulazu treći generator sinusnog signala smetnje,
- d) na regulacijskom ulazu tri generatora, a na mrežnom ulazu četvrti generator sinusnog signala smetnje,
- e) na regulacijskom ulazu jedan generator pravokutnog, odnosno trokutastog signala smetnje i
- f) na regulacijskom ulazu jedan generator pravokutnog, odnosno trokutastog signala smetnje, a na mrežnom ulazu generator sinusnog signala smetnje.

Stupanj elektromagnetske kompatibilnosti je računat iz rezultata mjerenja po formulama (3) i (4), sada u obliku

$$S_{EMCI} = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \left[\frac{P_{ij}(f_n)}{O_{ij}(f_n)} \right]^2 \quad (23)$$

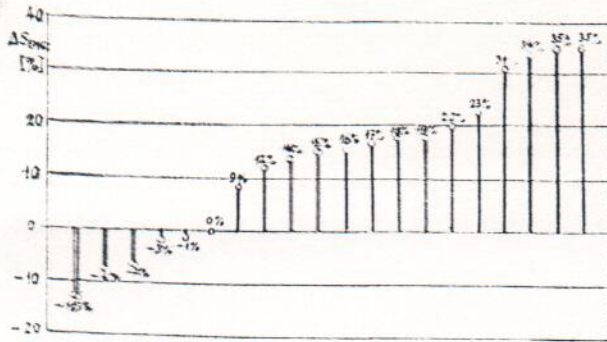
gdje je J broj ulaza signala smetnje (jedan ili dva), a N broj frekvencija signala smetnji.

U slučajevima od a) do d) broj frekvencija odgovara broju priključenih signal-generatora. U slučajevima e) i f) prvo je iz valnog oblika proračunat spektar efektivnih vrijednosti do 11-og harmonika napona signala smetnje, pa prema tome N u slučaju e) odgovara broju harmonika, a u slučaju f) broju harmonika uvećan za jedan (zbog sinusnog signala na mrežnom ulazu).

Detaljni rezultati eksperimenta i proračuna dani su u [1]. Kut pogreške ϵ je u svim pokusima bio graničan, pa je teoretski predviđen stupanj elektromag-

elektromagnetske kompatibilnosti
 stupanj elektromagnetske
 Slika 6
 var

netnske kompatibilnosti jednak jedinici. Svako odstupanje od jedinice predstavlja pogrešku kod određivanja stupnja elektromagnetske kompatibilnosti. Slika 7 prikazuje relativne pogreške kod određivanja stupnja elektromagnetske kompatibilnosti u pojedinačnim pokusima $\Delta S_{EMC} = (S_{EMC} - 1) \cdot 100 \%$.



Sl. 7. Relativna pogreška kod određivanja stupnja elektromagnetske kompatibilnosti

Maksimalna relativna negativna pogreška (potcjenjivanje problema kompatibilnosti) je -13% , a maksimalna pozitivna pogreška (precjenjivanje problema kompatibilnosti) je $+35\%$. Iz slike se vidi da je pojavljivanje pozitivne pogreške puno češće od pojavljivanja negativne pogreške.

5. ZAKLJUČAK

Uvođenjem stupnja elektromagnetske kompatibilnosti moguće je još u fazi razvoja i projekta s određenom točnošću kvantitativno predvidjeti mogućnost nastajanja elektromagnetski nekompatibilnih situacija unutar uređaja ili sistema, odnosno pojavu problema elektromagnetske kompatibilnosti. Na taj se način na vrijeme može intervenirati i kako ekonomski, tako i tehnički optimalno uspostaviti elektromagnetski sklad i riješiti problem elektromagnetske kompatibilnosti.

Definicija stupnja elektromagnetske kompatibilnosti ovisi o tome na koji način se može izraziti osjetljivost na smetnje prijemnika smetnji. Kako se kod većine električnih i elektroničkih uređaja koji se danas koriste, a rade s analognim signalima, osjetljivost na smetnje može izraziti preko srednje snage signala smetnje, taj slučaj je od posebnog interesa i on je posebno istražen.

Sistem koji se analizira sa stajališta elektromagnetske kompatibilnosti može imati više prijemnika smetnji, a svaki prijemnik smetnji može imati više ulaza preko kojih smetnje dolaze do dijela osjetljivog na smetnje (detektor smetnji). Zbog toga razlikujemo stupanj elektromagnetske kompatibilnosti jednog ulaza prijemnika smetnji S_{EMCij} , stupanj elektromagnetske kompatibilnosti jednog prijemnika smetnji S_{EMCI} i stupanj elektromagnetske kompatibilnosti cijelog sistema S_{EMC} .

Izvršen je niz laboratorijskih pokusa kod kojih je kao prijemnik smetnji uzet okidni uređaj za upravljanje tiristorima u trofaznim spojevima, a kao izvori smetnji uzeti su signal-generatori. Ustanovljeno je da se osjetljivost na smetnje okidnog uređaja može izraziti srednjom snagom signala smetnje, te da se uvođenjem stupnja elektromagnetske kompatibilnosti (na način opisan u radu) može ocijeniti i s određenom točnošću kvantitativno vrednovati moguća pojava problema elektromagnetske kompatibilnosti. Pogreška kod određivanja stupnja elektromagnetske kompatibilnosti je iznosom, a posebno predznakom prihvatljiva, zato što je veća vjerojatnost precjenjivanja (pozitivna pogreška), nego podcjenjivanja (negativna pogreška) moguće elektromagnetske nekompatibilnosti.

6. POPIS VAŽNIJIH OZNAKA

- $G_{ij}(f)$ funkcija i -tog izvora smetnji na j -tom izlazu
- \bar{N}_i maksimalno dozvoljena srednja snaga signala smetnje koja može doći na detektor i -tog prijemnika, a da on još ne bude smetan
- O_{ij} funkcija osjetljivosti i -tog prijemnika smetnji na j -tom ulazu
- $P_{ij}(f)$ spektar snage signala smetnje na j -tom ulazu i -tog prijemnika
- $P_{iJD}(f)$ spektar snage signala smetnje na j -tom ulazu i -tog prijemnika nakon prolaza prijenosnog dijela
- \bar{P}_{iJD} srednja snaga signala smetnje na j -tom ulazu i -tog prijemnika nakon prolaza prijenosnog dijela
- $P_{iD}(f)$ spektar snage signala smetnje i -tog prijemnika nakon sumacije
- $\hat{P}_{iD}(f)$ maksimalna vrijednost spektra snage $P_{iD}(f)$ u slučaju koherentnih signala smetnji
- \bar{P}_{iD} srednja snaga signala smetnje koja dođe na detektor i -tog prijemnika
- \hat{P}_{iD} maksimalna vrijednost \bar{P}_{iD} u slučaju koherentnih signala smetnji
- S_{EMCij} stupanj elektromagnetske kompatibilnosti j -tog ulaza i -tog prijemnika
- S_{EMCij}^* stupanj elektromagnetske kompatibilnosti ulaza nakon provedene intervencije s ciljem postizavanja elektromagnetske kompatibilnosti
- S_{EMCI} stupanj elektromagnetske kompatibilnosti i -tog prijemnika
- S_{EMCI}^+ pomoćni stupanj elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika koji se koristi kod proračuna stupnja elektromagnetske kompatibilnosti sistema ($S_{EMCI}^+ = 1$ ako je $S_{EMCI} < 1$ i $S_{EMCI}^+ = S_{EMCI}$ ako je $S_{EMCI} \geq 1$)
- \hat{S}_{EMCI} maksimalna vrijednost stupnja elektromagnetske kompatibilnosti prijemnika u slučaju koherentnih signala smetnji

S_{EMC} stupanj elektromagnetske kompatibilnosti sistema
 $T_i(f)$ funkcija prijenosa i -tog prijenosnog puta
 $\beta_{ij}(f)$ prijenosna karakteristika j -tog ulaza i -tog prijemnika smetnji
 $\delta(f)$ Diracova delta »funkcija«

- [3] N. Wax, **Noise and Stochastic Processes**, Dover Publications, New York, 1954.
 [4] A. H. W. Beck, **Statistical Mechanics, Fluctuations and Noise**, Edward Arnold Press, London, 1976.
 [5] H. M. Sachs, Developing Tailored EMI System Specifications, **EMC 1975**, str. 105—109, Montreux, 1975.
 [6] E. Zentner, Utjecaj smetnji na prijenos informacija i rad elektroničkih sustava, **Zbornik radova JUREMA 1977**, Svezak 11, str. K—12, Zagreb, 1977.

7. LITERATURA:

- [1] D. Stipaničev, **Analiza mogućnosti ocjenjivanja elektromagnetske kompatibilnosti**, Magistrski rad, Zagreb, 1980.
 [2] R. A. Pearlman, Physical Interpretation of the IEMCAP integrated EMI margin, **1948. IEEE Symp. Rec. on EMC**, Atlanta, USA, str. 310—315, 20—22, June 1978.

NASLOV AUTORA:

Mr Darko Stipaničev, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split

Primljeno: 13. I 1982.