

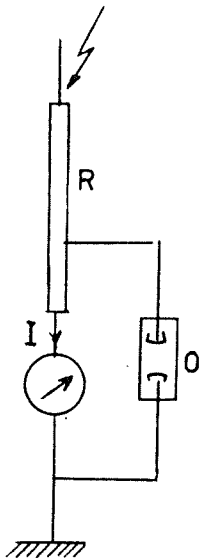
IX MERENJA U TEHNICI VISOKIH NAPONA

Merenja u tehnici visokih napona su veoma raznorodna kako u pogledu dijapazona pojedinih merenih veličina, tako i u pogledu metoda merenja i raznorodnosti primenjenih instrumenata. Veličine koje se najčešće mere su naponi i struje različitih amplituda, oblika i polariteta, električna opterećenja, kapaciteti i uglovi gubitaka kod kondenzatora. Pored toga važan faktor pri većini merenja je i vreme trajanja pojedinih merenih pojava.

Dijapazoni **merenih veličina** su veoma različiti što zahteva i različite metode i instrumente. Tako na primer mere se naponi od reda μV do MV , struje od reda μA do reda stotine kA , vreme od μs do reda časova, dana pa i godina.

Radi lakšeg i preglednijeg izlaganja raznovrsnih merenih metoda i instrumenata izložićemo najpre metode i instrumente koji se pri merenju upotrebljavaju, navodeći koje veličine i sa kakvim specifičnostima po navedenoj metodi odnosno navedenim instrumentima mogu izmeriti.

1. Merenje napona običnim voltmetrom može se kod jednosmernog i naizmenničnog napona vršiti kao i kod niskonaponskih metoda direktnim priključkom voltmetra sve do njegovog najvišeg napona, odnosno opsega. Proširenje opsega merenja pri merenju jednosmernih i naizmenničnih napona može se postići vezivanjem voltmetra preko delila napona, o čemu će biti reči malo kasnije.



sl. 259

Merenje visokog naizmenničnog napona običnim voltmetrom može se vršiti i preko kapacitivnih ili induktivnih naponskih transformatora priključenih u tački gde želimo da izmerimo napon. Merenje naizmenničnog napona može se vršiti i voltmetrom priključenim u primarno kolo visokonaponskog ispitnog transformatora. U tom slučaju voltmetrom se meri visoki

napon putem množenja, izmerene vrednosti napona na niskom naponu, sa odnosom preobražaja ispitnog transformatora. Pri ovom načinu merenja treba voditi računa da mogu nastati greške pri merenju usled Ferentijevog efekta ako je na strani visokog napona priključen kakav veći kapacitet, na primer kapacitet samog transformatora i objekta koji se ispituje, kao i veliko rasipanje samog ispitnog transformatora.

2. Merenje napona ampermetrom sa rednim otporom koje se može primeniti kod jednosmernih i naizmeničnih napona, prikazano je na slici 259. Merenjem struje koja protiče preko poznatog velikog otpora R , pomoću osetljivog instrumenta, može se zanemarujući malu vrednost otpora instrumenta dobiti vrednost visokog napona $U = RI$. Paralelno sa instrumentom, a još bolje i sa delom otpora R , treba vezati odvodnik prenapona ili probojni osigurač radi zaštite instrumenta od eventualnog delimičnog preskoka ili proboja na visokoomskom otporu R . Greška koja može nastati pri merenju može biti prouzrokovana usled zanemarenja otpora instrumenta, promene otpora R usled temperature ili od pojave korone na visokoomskom otporu R . Ovo poslednje treba svakako sprečiti jer se veličina greške ne može lako oceniti. Kod merenja naizmeničnih napona pomoću rednog otpora može se greška merenja pojaviti i usled parazitnih kapaciteta prema zemlji i između delova samog otpornika u zavisnosti od njegovih dimenzija i načina motanja otporne žice. Stoga se za merenje naizmeničnih napona može umesto otpornika R primeniti redno vezan kondenzator kapaciteta C , prema slici 260. Izmerena struja proporcionalna je priključenom naponu



sl. 260

$I = \omega CU$. I ovde može nastati greška u merenju ako naizmenični napon ima viših harmonika. Efektivna vrednost visokog naizmeničnog napona koji sadrži više harmonike data je izrazom:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots + U_n^2} \quad (681)$$

pri čemu napon osnovne

učestanosti U_1 stvara struju $I_1 = \omega_1 C U_1$, treći harmonik napona U_3 stvara struju $I_3 = \omega_3 C U_3$ pri čemu je $\omega_3 = 3\omega_1$ itd. tako da je ukupna struja:

$$I = c\sqrt{(\omega_1 U_1)^2 + (\omega_3 U_3)^2 + (\omega_5 U_5)^2 + \dots + (\omega_n U_n)^2}$$

$$I = c\omega_1 \sqrt{U_1^2 + 9U_3^2 + 25U_5^2 + \dots + n^2 U^2} \quad (682)$$

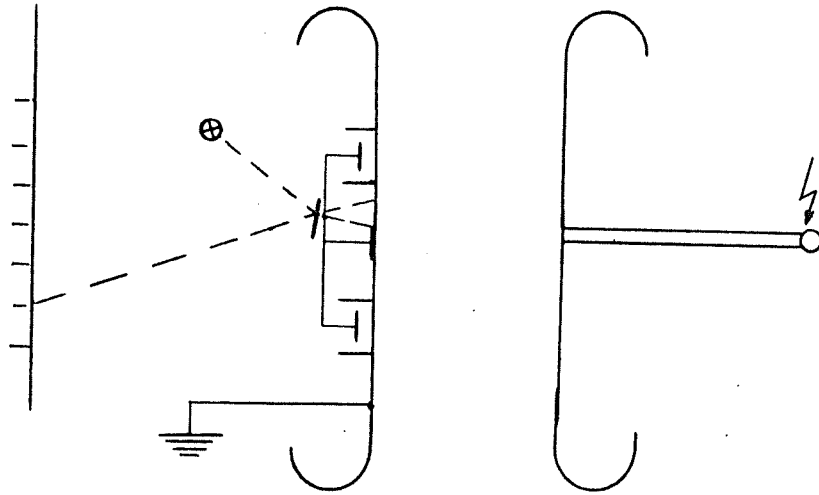
Na ovaj način, iz rezultatne struje, izračunata vrednost napona ima veće vrednosti, o čemu treba voditi računa.

3. Elektrostatički voltmetri za visoki napon imaju tu prednost što se mogu direktno priključiti na visoki napon i što im je potrošnja vrlo mala. Princip rada elektrostatičkog voltmetra zasniva se na mehaničkoj sili u elektrostatičkom polju, koja se na primer kod pločastog kondenzatora površine S i rastojanja elektroda d pri vazduhu kao dielektriku može izračunati po obrascu:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{S}{d^2} U^2 \quad (683)$$

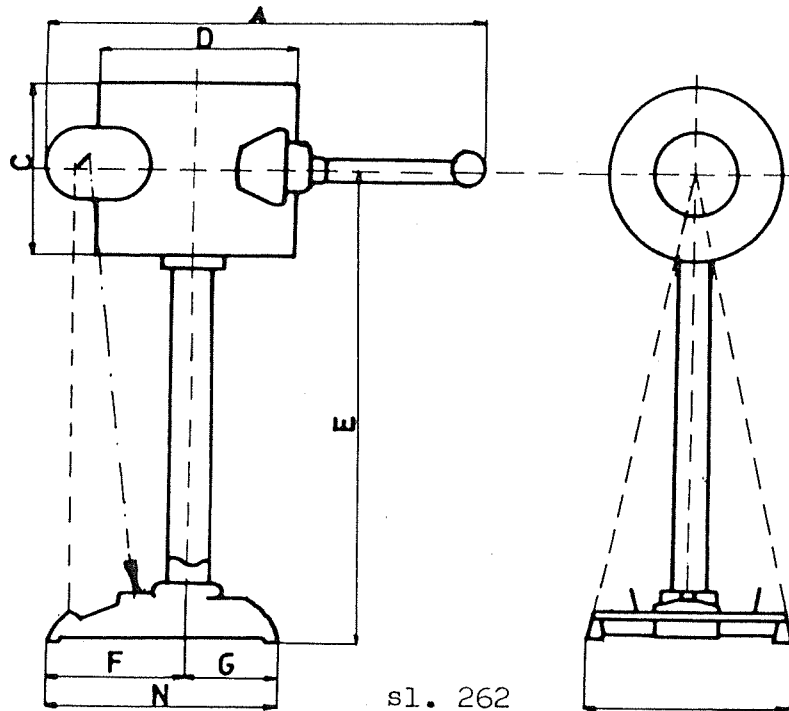
Ako je jedan deo jedne elektrode pokretan usled delovanja ove sile, koja privlači elektrode, nastaje pomeranje ovog pokretnog dela. Njegovo pomeranje stazmerno je kvadratu napona te instrumenat meri efektivnu vrednost naizmeničnog napona. Pri merenju jednosmernog napona sila je nezavisna od polariteta priključenog napona. Kapacitet između ploča je reda veličine 5 do 50 pF a otpor izolacije prema masi reda 10^{13} oma. Izrađuju se za napone i do 500 kV a tačnost ovih instrumenata može da bude i do 1%.

Na slici 261 data je principska šema rada jednog ovakvog elektrostatičkog voltmetra. Elektrode kružnog oblika čiji su krajevi kao na slici ili odgovaraju obliku elektroda Rogovskog imaju u sredini između njih praktično homogeno polje. Jedna od elektroda ima u sredini otvor u kome se nalazi lako pokretni deo sa malim ogledalom. Priključkom napona deluje mehanička sila na ovaj lako pokretni deo. Malo ogledalo skreće svetlosni zrak koji dolazi od svetlosnog izvora za ugao srazmeran sili odnosno kvadratu napona, te se na skali



sl. 261

direktno čita veličina priključenog napona. Da bi se sprečilo oscilovanje pokretnog organa predviđeni su naročiti pri-
gušivači koji su na slici 261 predstavljeni kao vazdušni pri-
gušivači. Promena opsega merenja postiže se promenom rasto-
janja elektroda. Na slici 262 dat je izgled jednog elektrosta-
tičkog voltmetra do 100 kV sa elektrodama Rogovskog.



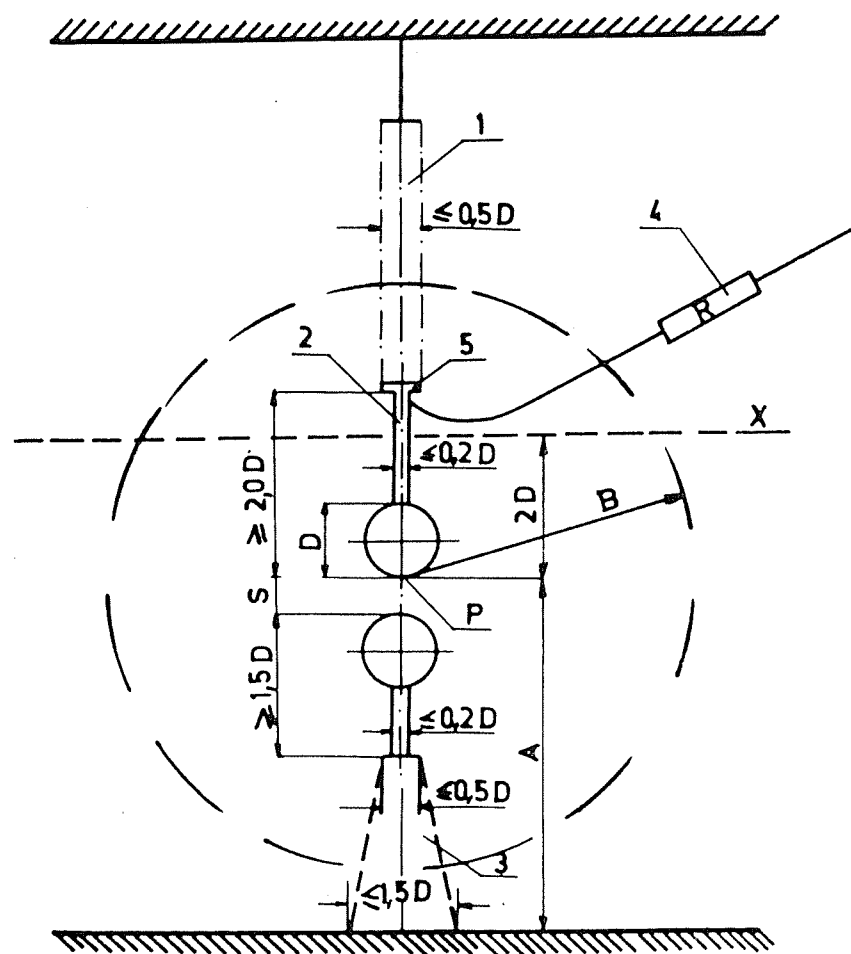
sl. 262

4. Sferno iskrište je prihvaćeno kao osnovni instrument za merenje visokih napona jer je veoma jednostavno a i samo rukovanje i održavanje ne zahteva specijalnu obuku, dok mu je tačnost u zadovoljavajućim granicama. Sa sfernim iskrištem se mogu meriti jednosmerni, naizmenični i impulsni naponi, kao i visoki naponi visokih učestanosti. Daćemo glavne podatke i uputstva za merenje sfernim iskrištima prema jugoslovenskim propisima JUS N.A5.510.

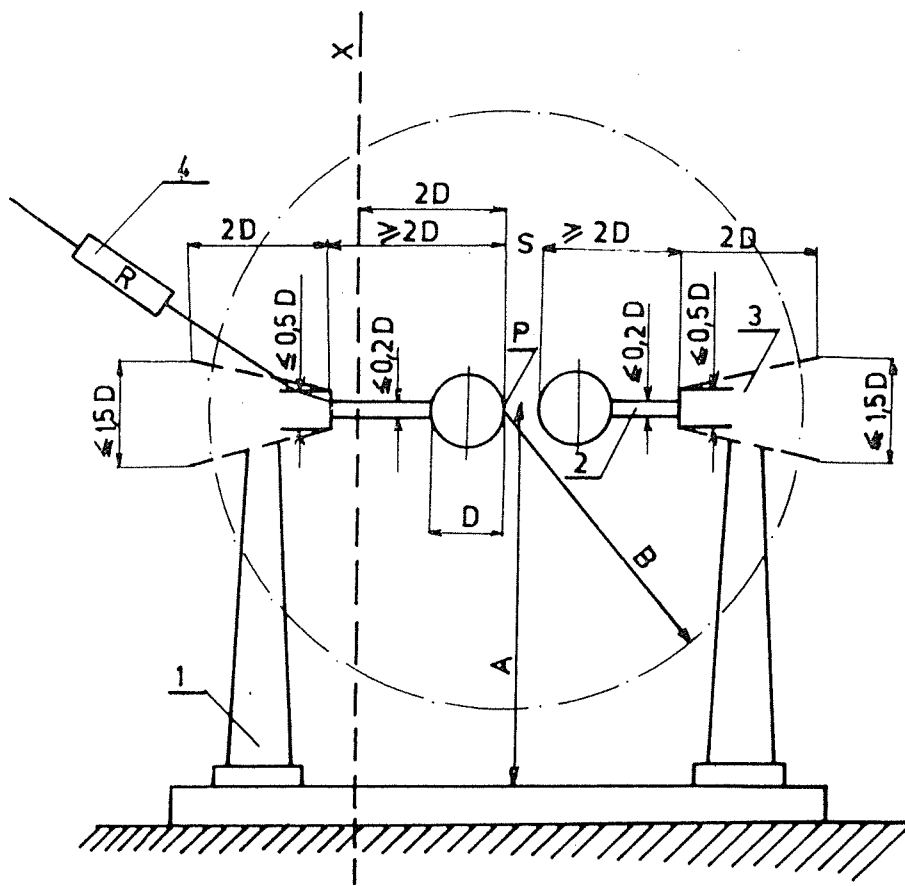
Standardno sferno iskrište je uređaj za merenje te-
menih vrednosti napona i sastoji se od dve metalne sfere (naj-
češće od bakra) jednakih prečnika D , sa držačima, mehanizmom
za pokretanje, izolacionim nosačima, postoljem i provodnici-
ma koji ih spajaju sa tačkama gde se meri napon. Prečnici sfe-
ra su standardizovani sledećim nizom vrednosti: 2; 5; 6,25;
10; 12,5; 15; 25; 50; 75; 100; 150 i 200 cm. Prečnik sfera ne
sme nigde odstupati za više od 2% od nazivne vrednosti. Povr-
šina sfera mora biti glatka i bez napravnosti, a u području
oko mesta preskoka ne sme biti nastavaka. Područje oko mesta
preskoka ograničeno je krugom opisanim oko tačke preskoka šes-
tarom otvora $0,3 D$. Odstupanje od idealnog oblika sfere prove-
rava se sferometrom i ne sme biti veće od 0,1% za prečnike do
100 cm, a za veće prečnike ne veće od 0,2%.

U prostoru oko sfernog iskrišta ne treba da bude ni-
kakvih stranih električnih polja, a isto tako nikakvih stra-
nih tela ili površina koje bi mogle da poremete električno
polje između sfera i time pokvare tačnost merenja. Da bi se
ovo ostvarilo na slici 263 date su granične mere i raštojanja
karakterističnih elemenata vertikalnog sfernog iskrišta, a na
slici 264 isto to za horizontalno sferno iskrište.

Vrednosti za raštojanja A i B sa slika 263 i 264 za
razne prečnike sfera date su u Tablici XV.



- 1 - Izolacioni nosač
- 2 - Držač elektrode
- 3 - Mehanizam za pokretanje sa naznakom njegovih najvećih dozvoljenih mera
- 4 - Dovodni provodnik sa zaštitnim otpornikom
- 5 - Elektroda za raspored polja sa naznakom njenih najvećih dozvoljenih mera
- A - Udaljenost tačke preskoka od uzemljene ravni
- B - Poluprečnik sfere bez stranih predmeta
- P - Tačka preskoka visokonaponske elektrode
- X - Granična ravan za dovodni provodnik



- 1 - Izolacioni nosač
- 2 - Držač elektrode
- 3 - Mehanizam za pokretanje sa naznakom njegovih najvećih dozvoljenih mera
- 4 - Dovodni provodnik sa zaštitnim otpornikom
- A - Udaljenost tačke preskoka od uzemljene ravni
- B - Poluprečnik sfere bez stranih predmeta
- P - Tačka preskoka visokonaponske elektrode
- X - Granična ravan za dovodni provodnik

TABLICA XV

Prečnik elektrode D (cm)	Najmanja vrednost A	Najveća vrednost A	Najmanja vrednost B
do 6,25	7 D	9 D	14 S
10 do 15	6 D	8 D	12 S
25	5 D	7 D	10 S
50	4 D	6 D	8 S
75	4 D	6 D	8 S
100	3,5 D	5 D	7 S
150	3 D	4 D	6 S
200	3 D	4 D	6 S

S - je razmak između elektroda

Pri merenju jednosmernih i naizmjeničnih napona sfernim iskrištem na red sa iskrištem treba uključiti praktično neinduktivni otpor veličine 0,1 do 1 M oma. Ovaj otpornik treba da smanji izgaranje elektroda pri preskoku i priguši visokofrekventne oscilacije koje mogu dovesti do pogrešnog reagovanja iskrišta a time i do netačnog merenja. Ukoliko ovaj otpornik, usled velikih kapacitivnih struja elektroda, pri radu sa visokim učestanostima stvara veliki pad napona treba ga u odgovarajućoj srazmeri smanjiti. Ovaj otpornik treba priključiti što bliže sfernom iskrištu ali nikako u zajednički dovod koji spaja izvor napona sa iskrištem i ispitivanim objektom.

Pri merenju udarnih napona može se takodje na red sa iskrištem staviti neinduktivni otpor čija vrednost ne sme biti veća od 500 oma. I ovaj otpor ima dvostruku ulogu. Sa jedne strane on služi da smanji strminu rezanog napona koja može izazvati nepoželjna naprezanja ispitivanog objekta, a sa druge strane da smanji odnosno priguši oscilacije u kolu merenog iskrišta koje mogu dati viši napon na mernim elektrodama od onoga koji vlada na ispitivanom objektu.

Jonizacija vazduha u medjuelektrodom razmaku sfernih iskrišta utiče na preskočni napon sfernih iskrišta. Kod merenja temenih vrednosti napona ispod 50 kV, sa bilo kojim prečnikom elektroda, preporučuje se prethodna jonizacija radioak-

tivnim materijama ili primenom kvarcne lampe sa živinom parom. Kod merenja napona elektrodama do 12,5 cm jonizaciju treba vršiti za bilo koju vrednost napona.

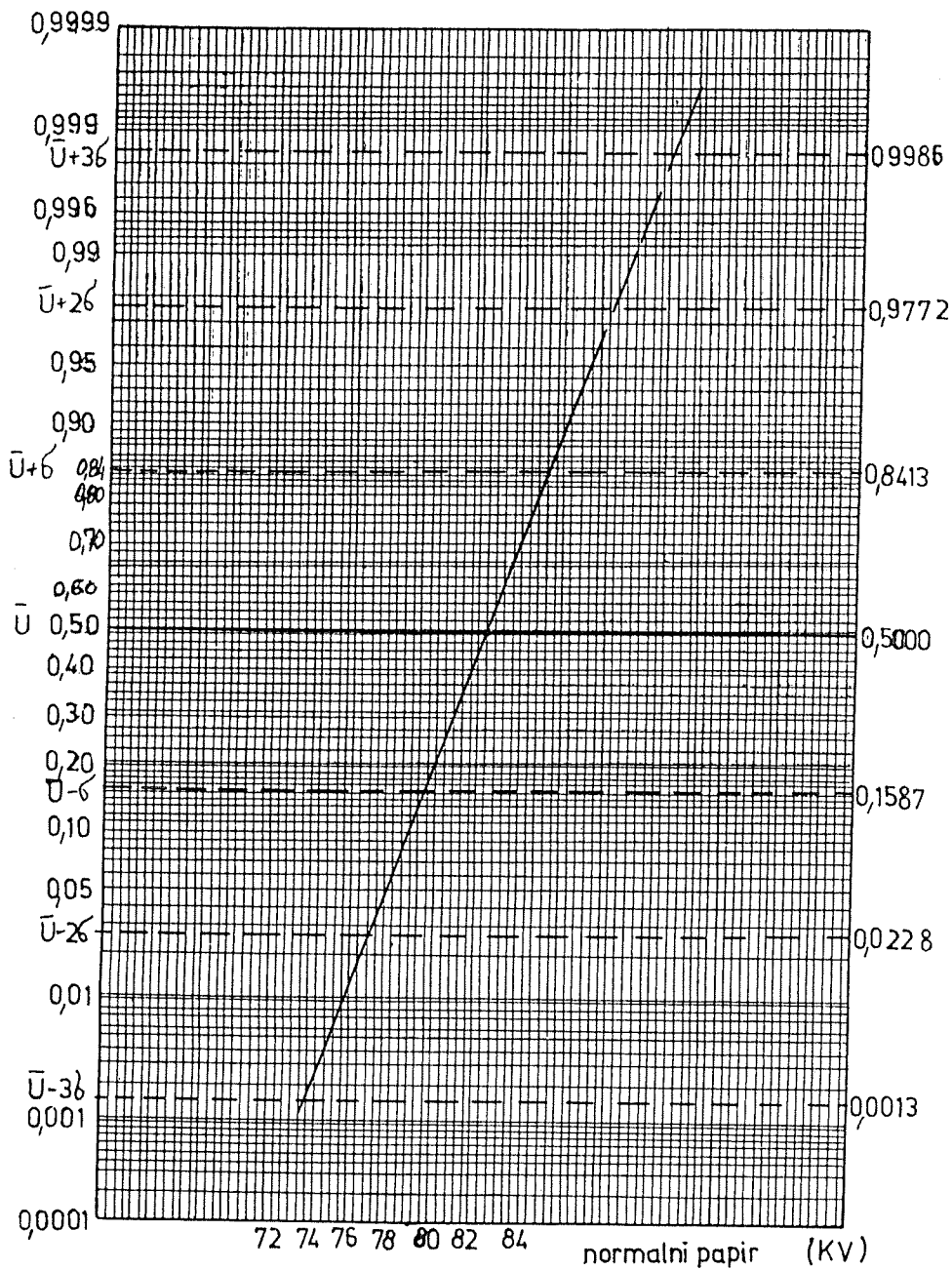
Merenje napona sfernim iskrištima razlikuje se kod jednosmernih i naizmeničnih od merenja kod udarnih napona. Kod merenja jednosmernih i naizmeničnih napona postupak može biti dvojak. Na elektrode se priključi konstantan napon, a razmak između elektroda se postepeno smanjuje dok ne nastupi preskok. Brzina primicanja sfera ne treba da bude veća od 0,01 D cm/sek tj. 1% od prečnika sfere u cm/s. Drugi način je da se na elektrode sa konstantnim razmakom priključi napon koji se zatim postepeno povišava dok ne nastupi preskok. Amplituda priključenog napona u prvom trenutku treba da je dovoljno niska da ne nastane preskok za vreme prelaznih pojava pri uključenju. Obično se priključi oko polovine vrednosti očekivanog preskočnog napona. Napon treba podizati postepeno tako da stupnjevi povišenja napona iznad 75% konačne vrednosti ne budu veći od 2%.

Ako pri merenju ima u vazduhu ili na površinama sfere vlage, prašine ili vlakana, mogu nastati preskoci pri nižim naponima, naročito kod jednosmernih napona, pa je u tom slučaju potrebno izvršiti više preskoka pre početka merenja. Kao izmerena vrednost smatra se srednja vrednost od najmanje tri uzastopna merenja, čije se ekstremne vrednosti razlikuju najviše za 3%.

Uobičajeni postupak merenja odnosno baždarenja sastoji se u utvrdjivanju odnosa između visokog napona merenog sfernim iskrištem i pokazivanja voltmetra, katodnog oscilografa ili nekog drugog pomoćnog mernog instrumenta. Utvrdjivanje ovoga odnosa treba redovno izvesti za 100% ispitnog napona, ali se može, kada je to neophodno izvršiti ekstrapolacija od napona koji nije niži od 80% ispitnog napona. Ekstrapolacija može biti neispravna ako pri promeni napona od 80% do 100% ispitnog napona nastaje kakva nelinearnost u ispitnom kolu (struja transformatora, pojava korone, promena oblika napona itd.)

Merenje udarnog napona sfernim iskrištem vrši se na taj način što se odredi vrednost udarnog napona sa 50% preskoka, tj. određuje se takozvani 50% udarni napon. I ovde postupak može biti dvojak. Prvi je da se iskrište postavi na određeno međusobno rastojanje elektroda, pa se udarni napon po-

diže u stupnjevima od najviše 2% očekivanog preskočnog napona. Pri svakom stupnju treba primeniti 6 udara. Vremenski razmak između dva uzastopna udara ne treba da je kraći od 5 sekundi. Vrednost 50% preskočnog napona najbolje se može dobiti interpolacijom između dva stupnja napona i to jednog koji daje 2 preskoka ili manje, i drugog koji daje 4 preskoka ili više. U tu svrhu najbolje je koristiti normalni papir dat na slici 265 na kome je po ordinati naneta raspodela koja od-



sl. 265

govara Gaussovom integralu krive verovatnoće, a na apscisi bi se nanosile vrednosti napona pojedinih stupnjeva. Često se umesto 6 udara primenjuje i 10 udara postupajući na isti način kako je gore opisano. No sa 10 udara se može, manje tačno, dobiti direktno vrednost 50% preskočnog napona na taj način ako se napon udarnog generatora podesi tako da u nizu od 10 udara bude 4 do 6 preskoka. Ta vrednost napona se može smatrati 50% preskočnim naponom.

Drugi način je da se udarni generator postavi tako da daje jednu vrednost udarnog napona a sfere iskrišta se pomeraju u stupnjevima od najviše 2% vrednosti koja se očekuje za mereni 50% preskočni napon. Pri svakom rastojanju iskrišta izvede se 6 udara. Vrednost 50% preskočnog napona dobija se interpolacijom između dva razmaka elektroda koje odgovaraju 2 i 4 preskoka, koristeći normalni papir. I kod ovoga načina se može koristiti manje tačna metoda sa 10 udara na taj način da se rastojanje sfera podesi tako da pri 10 udara 4 do 6 udara dovodi do preskoka. Na slici 265 nacrtana je prava koja spaja dve tačke za razne vrednosti preskočnih napona sa 2 i 4 preskoka i dobivena 50% vrednost preskočnog napona od 82,4 kV.

Ukoliko se pri merenju udarnih napona baždarenje ne može vršiti do punog ispitnog napona dozvoljena je ekstrapolacija od napona ne manjeg od 60% ispitnog napona, pri čemu treba voditi računa da postoji proporcionalnost i iznad 60% ispitnog napona. Pri baždarenju ne sme biti promene u kolu u kome će se vršiti ispitivanje punim ispitnim naponom.

Vrednost preskočnih napona za različite prečnike i razmake elektroda date su u tablicama XVI i XVII. Tablica XVI ne vredi za merenje udarnih napona nižih od 10 kV.

Tablice se mogu upotrebiti, bez znatnije greške, i za merenje udarnih napona koji imaju duže vreme trajanja čela od standardnog.

Vrednosti iz tablice XVI mogu se koristiti za merenje naizmeničnih napona učestanosti sve do 1000 Hz. Za merenje naizmeničnih napona visokih učestanosti, bilo da su prigušene ili ne, postoje izvesna ograničenja. Za merenja neprigušenih naizmeničnih napona viših učestanosti tablica XVI se može primeniti do 20 kHz dok za više učestanosti dolazi do sniženja preskočnog napona od 15% pa čak i do 35%. Kod prigušenih

Pri merenju naizmeničnih i udarnih napona koristeći tablice XVI i XVII smatra se da je tačnost postignutih merenja $\pm 3\%$ za razmake elektroda koji ne prelaze 0,5 D. Za razmake od 0,5 D do 0,75 D greška je neodređena te su ove vrednosti navedene u zagradaama. Pri merenju jednosmernih napona, uz ranije navedene mere uklanjanja vlage i prašine, može se smatrati da je tačnost merenja pomoću tablica $\pm 5\%$ za razmake elektroda do oko 0,4 D. Preporučuje se pri merenjima da se ista ne vrše sa razmacima elektroda manjim od 0,05 D.

Vrednosti preskočnih napona datih u tablicama XVI i XVII važe za standardne atmosferske uslove. Standardni atmosferski uslovi su definisani preko temperature okoline od 20°C , atmosferskog pritiska od 1013 milibara (101325 Pa) i vlažnošću od 11 g/m^3 .

Kada se atmosferski uslovi za vreme merenja razlikuju od standardnih, vrednosti preskočnih napona (U_s) iz tablica XVI i XVII treba korigovati množenjem korekcionim faktorom K koji zavisi od relativne gustine vazduha δ . Relativna gustina vazduha data je obrascem:

$$\delta = \frac{b}{1013} \frac{273 + 20}{273 + t} = 0,289 \frac{b}{273 + t} \quad (684)$$

gde su:

b - atmosferski pritisak u milibarima

t - temperatura vazduha u $^{\circ}\text{C}$

Kada je vrednost atmosferskog pritiska data u Pa / p i p_0 /obrazac za relativnu gustinu vazduha glasi:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273 + 20}{273 + t} = 2890 \frac{10^{-6} p}{273 + t} \quad (685)$$

Vrednost korekcionog faktora K u zavisnosti od relativne gustine vazduha δ data je u tablici XVIII.

Ako je U_s vrednost preskočnog napona iz tablica XVI i XVII za standardne uslove, onda se preskočni napon za uslove u toku merenja izračunava prema obrascu:

$$U = K U_s \quad (686)$$

Za relativne gustine vazduha izmedju 0,95 i 1,05 je $K = \delta$

TABLICA XVIII

K	0,72	0,77	0,82	0,86	0,91	0,95	1,00	1,05	1,09	1,13
δ	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15

Ako za jedan odredjeni napon treba utvrditi preskočni razmak elektorda za uslove koji se razlikuju od standardnih uslova, onda taj napon treba deljenjem sa korekcionim faktorom K svesti na standardne uslove i za tako izračunatu vrednost napona naći odgovarajući razmak elektroda u tablicama XVI i XVII.

Uticaoj vlažnosti vazduha na preskočni napon sfernih iskrišta nije dovoljno poznat, ali se smatra da u granicama normalnih vlažnosti koje se sreću pri merenjima odstupanja nisu veće od 2 do 3%, te se stoga korekcija merenih vrednosti u pogledu vlažnosti ne vrši.

TABLICA XVI

Temene vrednosti preskočnog napona u kV (za udarno napono sa 50% preskoka) za iskrište sa jednom uzemljenom elektrodom

Tablica važi za:

- nizmienične napone
- standardne negativne pune udarne napone (1,2/50),
- negativne udarne napone dužeg trajanja zaželja
- jednosmerne napone oba polariteta

Razmak elektr. rodu S cm	Temene vrednosti u kV (na 20 °C i 1 013 milibara)											
	Prečnik elektrode cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05	2,8											
0,10	4,7											
0,15	6,4											
0,20	8,0	8,0										
0,25	9,6	9,6										
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40,0)	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		53,0	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		57,5	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0			
2,2		61,5	63,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		65,5	67,5	69,5	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(69,0)	72,0	74,5	75,0	75,5	75,5	75,5	75,5			
2,8		(72,5)	76,0	79,5	80,0	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(75,5)	79,5	84,0	85,0	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(82,5)	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0	86,0	
4,0		(88,5)	(95,0)	105	108	110	112	112	112	112	112	
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125	125	
5,0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	138
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	151
6,0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	164

Tablica XVI(nastavak)

Razmak elektroda S cm	Temone vrednosti u kV (na 20 °C i 1 013 milibara)											
	Prečnik elektroda cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
6,5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7,0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7,5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	
8,0					(174)	(185)	206	214	215	215	215	
9,0					(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10						(195)	(209)	244	263	265	266	266
11							(219)	261	286	290	292	292
12							(229)	275	309	315	318	318
13								(289)	331	339	342	342
14								(302)	353	363	366	366
15								(314)	373	387	390	390
16								(326)	392	410	414	414
17								(337)	411	432	438	438
18								(347)	429	453	462	462
19								(357)	445	473	486	486
20								(366)	460	492	510	510
22									489	530	555	560
24									515	565	595	610
26									(540)	600	635	655
28									(565)	635	675	700
30									(585)	665	710	745
32									(605)	695	745	790
34									(625)	725	780	835
36									(640)	750	815	875
38									(655)	(775)	845	915
40									(670)	(800)	875	955
45										(850)	945	1 050
50										(895)	1 010	1 130
55										(935)	(1 060)	1 210
60										(970)	(1 110)	1 280
65											(1 160)	1 340
70											(1 200)	1 480
75											(1 230)	1 540
80											(1 490)	1 600
85											(1 540)	1 660
90											(1 580)	1 720
100											(1 660)	1 840
110											(1 730)	(1 940)
120											(1 800)	(2 020)
130												(2 100)
140												(2 180)
150												(2 250)

Napomene:

1. Vrednost u tabeli 3 ne važi za merenje udarnih napona ispod 10 kV.
2. Vrednosti za razmake elektroda iznad 0,5 D nisu pouzdane, to su stavljene u zagradu.

TABLICA XVII

Temene vrednosti preskočnog napona sa 50% preskoka u kV za iskrište sa jednom uzemljenom elektrodom

Tablica važi za:

— standardne pozitivne pune udarne napone (1,2/50).

— pozitivne udarne napone dužeg trajanja začetja

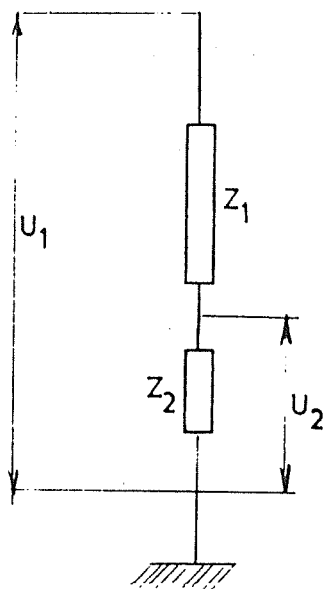
Razmak elektroda S cm	Temene vrednosti u kV (na 20 °C i 1 013 milibara)											
	Prečnik elektroda cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05												
0,10												
0,15												
0,20												
0,25												
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,8	37,6	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	43,3	43,2	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40,0)	46,2	45,9	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		49,0	48,6	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		54,5	54,0	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		59,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0			
2,2		64,0	64,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		69,0	69,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(73,0)	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5			
2,8		(77,0)	78,0	80,5	80,5	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(81,0)	82,0	85,5	85,5	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(90,0)	(91,5)	97,5	98,0	98,5	99,0	99,0	99,0	99,0		
4,0		(97,5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112		
4,5			(108)	120	122	124	125	125	125	125		
5,0			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138	
5,5				(139)	145	147	151	151	151	151	151	151
6,0				(148)	155	158	163	164	164	164	164	164

Tablica XVII (nastavak)

Razmak elektroda S cm	Temene vrednosti u kV (na 20 °C i 1 013 milibara)											
	Prečnik elektroda cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
6,5				(156)	(164)	168	175	177	177	177	177	
7,0				(163)	(173)	178	187	189	190	190	190	
7,5				(170)	(181)	187	199	202	203	203	203	
8,0					(189)	(196)	211	214	215	215	215	
9,0					(203)	(212)	233	239	240	241	241	
10					(215)	(226)	254	263	265	266	266	266
11						(238)	273	287	290	292	292	292
12						(249)	291	311	315	318	318	318
13							(308)	334	339	342	342	342
14							(323)	357	363	366	366	366
15							(337)	380	387	390	390	390
16							(350)	402	411	414	414	414
17							(362)	422	435	438	438	438
18							(374)	442	458	462	462	462
19							(385)	461	482	486	486	486
20							(395)	480	505	510	510	510
22								510	545	555	560	560
24								540	585	600	610	610
26								570	620	645	655	660
28								(595)	660	685	700	705
30								(620)	695	725	745	750
32								(640)	725	760	790	795
34								(660)	755	795	835	840
36								(680)	785	830	880	885
38								(700)	(810)	865	925	935
40								(715)	(835)	900	965	980
45									(890)	980	1 060	1 090
50									(940)	1 040	1 150	1 190
55									(985)	(1 100)	1 240	1 290
60									(1 020)	(1 150)	1 310	1 380
65										(1 200)	1 380	1 470
70										(1 240)	1 430	1 550
75										(1 280)	1 480	1 620
80											(1 530)	1 690
85											(1 580)	1 760
90											(1 630)	1 820
100											(1 720)	1 930
110											(1 790)	(2 030)
120											(1 860)	(2 120)
130												(2 200)
140												(2 280)
150												(2 350)

Napomena: Vrednosti za razmuke elektroda iznad 0,5 D nisu pouzdane, to su stavljene u zagradu.

5. Delila napona služe da visoke napone, koje želimo izmeriti svedu, podele, na niže vrednosti i omoguće priključak aparata i instrumenata koji imaju niži ulazni napon. Delilo napona se sastoji od dve nejednake impedanse vezane na red, prema slici 266. Impedansa Z_1 naziva se visokonaponska grana, impedansa Z_2 niskonaponska grana delila. Napon koji se želi izmeriti U_1 priključuje se na krajeve redno spojenih impedansi a merni instrument se priključuje na krajeve niskonaponske impedanse i meri napon U_2 . Prema vrsti impedansi delila se dele na:



sl. 266

- otporna (omsku) delila napona
 - kapacitivna delila napona
 - mešovita delila napona i
 - kompenzovana delila napona.

Sva delila napona moraju zadovoljavati sledeće uslove:

- 1) niski napon na delilu mora u svakom trenutku biti srazmeran visokom naponu,
- 2) delilo mora u pogledu svoga funkcionisanja biti nezavisno od oblika, učestanosti i polariteta primenjenog napona,
- 3) odnos deljenja delila mora biti nezavisan od temperature i spoljašnjih uticaja i
- 4) delilo ne sme uticati u velikoj meri na samu ispitivanu pojavu, prilikom njegovog priključka u kolo u kome želimo da izvršimo merenje.

Kako se kod primene delila često primenjuje koaksijalni kabl za vezu između delila i mernih instrumenata razmotrimo najpre odnose napona i struja na krajevima jednog idealnog koaksijalnog kabla. Pod idealnim koaksijalnim kablom podrazumevamo kabl kod koga su omski otpor i odvodnost tako mali da se mogu zanemariti. Napon i struja u nekoj tački ovakvog kabla dati su simboličnim jednačinama:

$$U_x = A e^{-\gamma x} + B e^{\gamma x} \quad (687)$$

$$I_x = \frac{A}{Z_0} e^{-\gamma x} - \frac{B}{Z_0} e^{\gamma x}$$

gde su uvedene poznate skraćenice:

$\gamma = p\sqrt{LC}$ - simbolična konstanta prostiranja

$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - simbolična karakteristična impedansa koja

je, usled zanemarenja omskog otpora i odvodnosti, realna

C - kapacitet koaksijalnog kabla po jedinici dužine

L - induktivitet koaksijalnog kabla po jedinici dužine

Za određivanje konstanti A i B uzmimo sledeće granične uslove. Na početku kabla tj. na ulazu neka je poznat napon U_2 za $x=0$. Drugi uslov je da je struja na kraju koaksijalnog kabla određena odnosom napona na kraju kabla i spoljašnje impedanse koja je priključena na kraju kabla tj. za $x=l$ $I_3 = U_3/Z_3$.

Zamenivši gore navedene granične uslove i rešivši vrednosti za konstante A i B, jednačine (687) postaju:

$$U_x = \frac{U_2 Z_3 e^{\gamma l} + U_3 Z_0}{Z_3 (e^{-\gamma l} + e^{\gamma l})} e^{-\gamma x} + \frac{U_2 Z_3 e^{-\gamma l} - U_3 Z_0}{Z_3 (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l})} e^{\gamma x}$$

$$I_x = \frac{U_2 Z_3 e^{\gamma l} + U_3 Z_0}{Z_0 Z_3 (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l})} e^{-\gamma x} - \frac{U_2 Z_3 e^{-\gamma l} - U_3 Z_0}{Z_0 Z_3 (e^{-\gamma l} + e^{\gamma l})} e^{\gamma x}$$

Iz gornjih jednačina za napon na kraju kabla dobija se stavljajući $x=l$ u prvu jednačinu:

$$U_3 = \frac{2Z_3 U_2}{(Z_3 - Z_0) e^{-\gamma l} + (Z_3 + Z_0) e^{\gamma l}} \quad (688)$$

i struja na početku kabla stavljajući u drugu jednačinu $x=0$:

$$I_2 = \frac{2U_3 Z_0 + U_2 Z_3 (e^{\gamma l} - e^{-\gamma l})}{Z_0 Z_3 (e^{\gamma l} + e^{-\gamma l})} \quad (689)$$

Posmatrajmo najpre slučaj kada je kabl na kraju otvoren tj. kada je $Z_3 \rightarrow \infty$. Iz jednačine (688) dobijamo:

$$U_3 = \frac{2U_2}{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}} = 2U_2 e^{-\gamma l} \frac{1}{1 + e^{-2\gamma l}} \quad (690)$$

Razvijajući u red razlomak:

$$\frac{1}{1 + e^{-2\gamma l}} = 1 - e^{-2\gamma l} + e^{-4\gamma l} - e^{-6\gamma l} + \dots$$

i zamenjujući ga u gornju jednačinu dobija se:

$$U_3 = 2U_2 (e^{-\gamma l} - e^{-3\gamma l} + e^{-5\gamma l} - e^{-7\gamma l} + \dots) \quad (690)$$

Ako je napon na početku kabla dat jednačinom $u_2(t)$ primenjujući pravilo o transpoziciji početka simbolično promenljive za konkretnu funkciju napona na kraju kabla se dobija:

$$u_3(t) = 2u_2(t - \sqrt{LC})H(t - \sqrt{LC}) - 2u_2(t - 3\sqrt{LC})H(t - 3\sqrt{LC}) + \\ + 2u_2(t - 5\sqrt{LC})H(t - 5\sqrt{LC}) - \dots \quad (691)$$

Kao što se iz ove jednačine vidi na kraju otvorenog kabla nastaje višestruko odbijanje, jer se vrednost napon menja u toku vremenskih intervala od $2t_0 = 2\sqrt{LC}$ koje vreme predstavlja dvostruko vreme potrebno da naponski talas predje dužinu kabla l . Dakle napon na kraju nije veran naponu na početku kabla.

Kako je struja na kraju otvorenog kabla nula, za struju na početku kabla se dobija iz jednačine (689) uz $Z_3 \rightarrow \infty$

$$I_2 = \frac{U_2 (e^{rl} - e^{-rl})}{Z_0 (e^{rl} + e^{-rl})} = \frac{U_3}{Z_0} \frac{e^{rl} - e^{-rl}}{2} \quad (692)$$

Drugi interesantan slučaj je kada je spoljašnja impedansa priključena na kraju kabla jednaka karakterističnoj impedansi kabla $Z_3 = Z_0$. Iz jednačine (688) za napon se dobija:

$$U_3 = U_2 e^{-rl} \quad (693)$$

odnosno prelazeći na konkretnu funkciju:

$$u_3(t) = u_2(t - \sqrt{LC}) H(t - \sqrt{LC}) \quad (694)$$

Kao što sledi napon na kraju kabla u ovome slučaju je isti sa naponom na početku samo je vremenski pomeren za vreme potrebno naponu da predje dužinu kabla l .

Za struju na početku kabla se iz jednačine (689) dobija:

$$I_2 = \frac{U_3}{Z_0} e^{-rl} \quad (695)$$

dakle, takodje ista sa strujom na kraju kabla, samo vremenski pomeren na unapred za vreme t_0 .

O ovim uslovima ćemo voditi računa i njih koristiti pri primeni koaksijalnih kablova u kombinaciji sa delilima napona, kada se radi o brzo promenljivim pojavama:

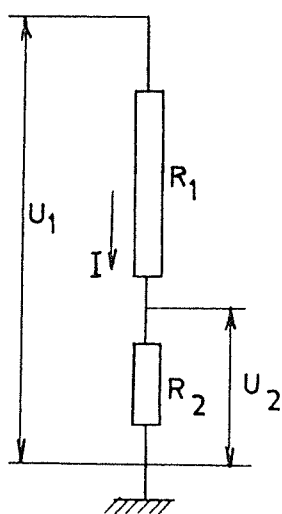
5. 1 Otporne (omska) delila napona su najprostije delila kod kojih se obe grane i visokonaponske i niskonaponske sastoje od čisto omskih otpora, tj. zanemaruju se neizbežne male vrednosti kapaciteta i induktiviteta koje postoje kod svakog otpora. Ako na ovakvo delilo pod pretpostavkom da na strani nižeg napona nema nikakvog opterećenja (slike 267) priključimo jednosmerni napon može se napisati sledeća relacija:

$$I = \frac{U_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_2}{R_2}$$

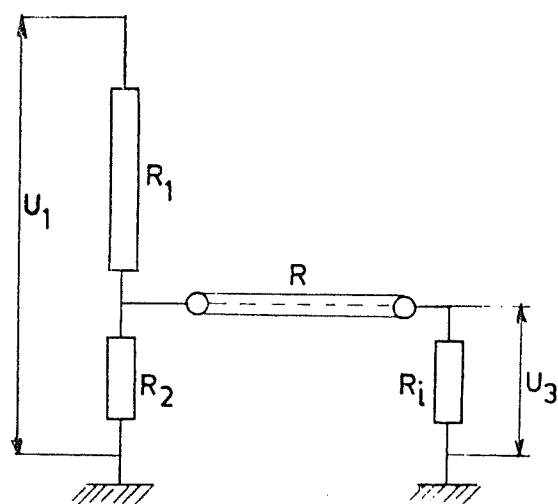
iz koje sledi odnos izmedju visokog i niskog napona koji se naziva odnosom deljenja delila u praznom hod:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (696)$$

gde su R_1 i R_2 otpori pojedinih grana delila. Ako je pak na strani nižeg napona delila priključen kakav instrument i to direktno ili preko kakvog provodnika (kabla) čija je otpornost poznata R , a unutrašnja otpornost instrumenta R_i , može se prema slici 268 odrediti sledeća relacija izmedju naponu U_1 na ula-



sl. 267



sl. 268

zu u delilo i naponu U_3 na priključcima instrumenta:

$$\frac{U_1}{U_3} = \frac{(R_1 + R_2)(R + R_i) + R_1 R_2}{R_2 R_i} \quad (697)$$

U slučaju da je otpor poveznog provodnika R zanemarljivo mali stavljajući $R = 0$ dobija se:

$$\frac{U_1}{U_3} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} + \frac{R_1}{R_i} = \frac{R_1 + \frac{R_2 R_i}{R_2 + R_i}}{\frac{R_2 R_i}{R_2 + R_i}} = \frac{R_1 + R_{ek}}{R_{ek}} \quad (698)$$

gde R_{ek} predstavlja vrednost paralelno vezanih R_2 i R_i .

Ako se na omsko delilo prema slici 267 u praznom hodu priključi naizmenični napon jednačina (696) prelazi u jednačinu:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

tj. naponi U_1 i U_2 su u fazi i stoje u odnosu deljenja delila.

Priključenje naizmeničnog napona na delila sa priključenim instrumentom preko provodnika odgovara slici 268 sa tom razlikom što se otpor provodnika R i instrumenta R_i zamenjuju impedansama Z i Z_i pa jednačina (697) postaje:

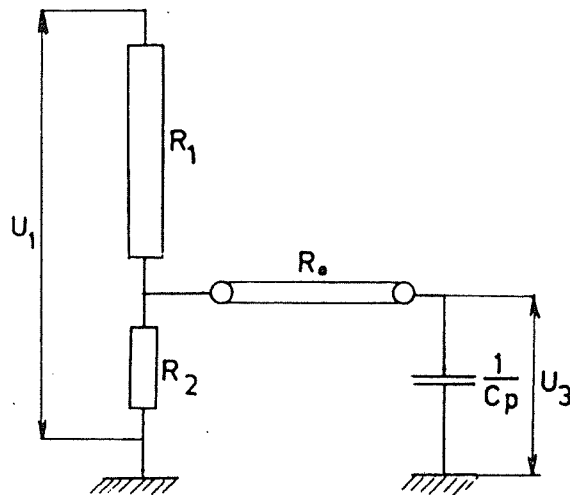
$$\frac{U_1}{U_3} = \frac{(R_1 + R_2)(Z + Z_i) + R_1 R_2}{R_2 Z_i} \quad (699)$$

Ako se zanemari impedansa poveznog provodnika $Z=0$ dobija se

$$\frac{U_1}{U_3} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} + \frac{R_1}{Z_i} \quad (700)$$

Iz jednačina (699) i (700) se vidi da ne samo što naponi U_1 i U_3 nisu u fazi već ni odnos deljenja delila nije konstantan već zavisi od učestanosti, pošto je funkcija impedansi Z i Z_i . Ovo je jedan od razloga što omska delila nisu u ovakvoj konstelaciji najpodesnija za merenje naizmeničnih napona.

Ako se radi o brzo promenljivim pojavama ili o naponima proizvoljnog oblika, kada se recimo za posmatranje pojave koristi katodni osciloskop može se prema šemi na slici 269 za



sl. 269

odnose napona U_1 i U_3 napisati simbolična jednačina uz uslov da je za $t=0$ sistem bio bez napona tj. $u_3(t)=0$, ako je sa C označen kapacitet osciloskopa

$$\frac{U_1(p)}{U_3(p)} = \frac{Cp[(R_1 + R_2)R_0 + R_1R_2] + R_1 + R_2}{R_2(R_0Cp + 1)} \quad (701)$$

Konkretno rešenje uzimajući da je napon U_1 dat Hevisajdovom jediničnom funkcijom glasi:

$$u_3(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 - \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R_0 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (702)$$

gde je $T_1 = \frac{[(R_1 + R_2)R_0 + R_1R_2]C}{R_1 + R_2}$ vremenska konstanta uspostavljanja napona.

Ukoliko ne postoji kabl pa je $R_0 = 0$ jednačina (701) prelazi u

$$\frac{U_1(p)}{U_3(p)} = \frac{CpR_1R_2 + R_1 + R_2}{R_2} \quad (703)$$

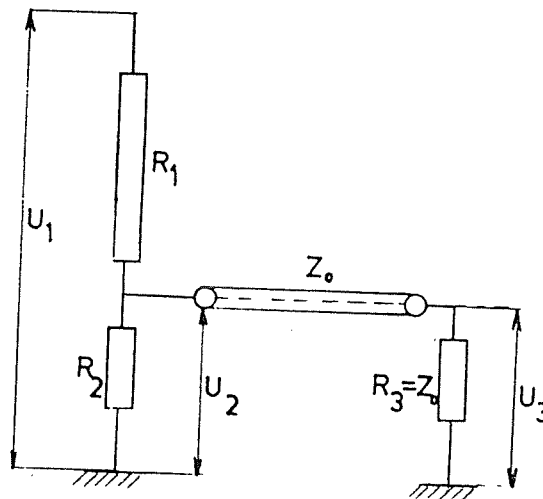
a jednačina (702) pod istim uslovima prelazi u:

$$u_3(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1'}} \right) \quad (704)$$

gde je sada T_1' :

$$T_1' = \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2} \quad (705)$$

Sa jedne strane vidimo da je uslov da izobličenje tj. promena dovedene pojave, napona U_1 , bude što manja na strani niskog napona zahteva što manju vremensku konstantu T_1 , a sa druge strane u ovome slučaju uopšte nismo uzeli u obzir vreme prostiranja naponskog talasa kroz kabl, već smo kabl u prvom slučaju predstavili aktivnom otpornošću R_0 . Smanjivanje vremenske konstante postiže se smanjivanjem priključenog kapaciteta C ali to dovodi do toga da nam je vod na kraju praktično otvoren te mogu nastati refleksije. Da bi se sprečile refleksije o kraju voda pri priključku male vrednosti kapaciteta, kapaciteta plo-



sl. 270

čica oscilografa, primenjuje se šema prema slici 270 kod koje je na kraju kabla priključen otpor ravan karakterističnoj impedansi kabla a paralelno sa njime veoma mali kapacitet oscilografa, tako da se on pri računu ne uzima u obzir. Sa oznakama na slici 270 može se napisati sledeća simbolična jednačina, gde je sa I_2 označena struja na početku kabla:

$$U_1 = U_2 + R_1 \left(\frac{U_2}{R_2} + I_2 \right) \quad (706)$$

Vodeći računa da između napona i struja na kraju i početku kabla postoje veze date jednačinama (693) i (695):

$$U_3 = U_2 e^{-\gamma l} \quad I_2 = \frac{U_3}{Z_0} e^{\gamma l}$$

koje kada se zamene u jednačinu (706) daju odnos napona:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\gamma l} = \frac{R_1 R_2 + R_1 Z_0 + R_2 Z_0}{R_2 Z_0} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2 R_3}$$

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\gamma l} = \frac{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{R_1 + R_{ek}}{R_{ek}} \quad (707)$$

Prelazeći na konkretnu funkciju za napon na kraju se dobija:

$$u_3(t) = \frac{R_{ek}}{R_1 + R_{ek}} u_1(t - \sqrt{LC}) H(t - \sqrt{LC}) \quad (708)$$

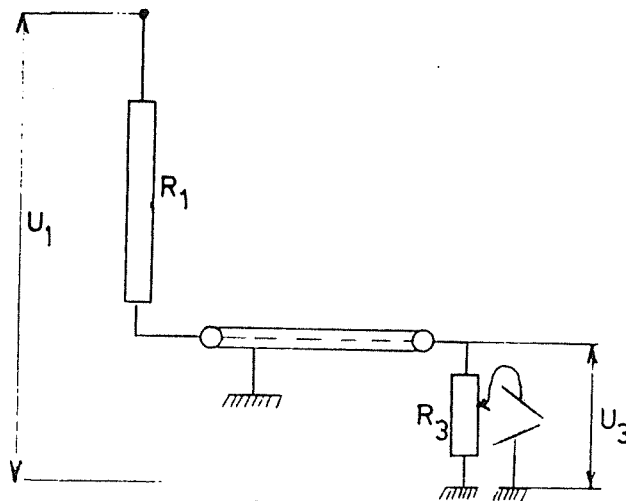
Dakle napon na kraju kabla je isti po obliku samo je umanjen za odnos deljenja delila i vremenski pomeren za vreme $t_0 = \sqrt{LC}$ potrebno da naponski talas predje dužinu kabla.

Kod ovakvih delila se najčešće otpori R_2 i R_3 biraju tako da budu jednaki što ima izvesnih prednosti u pogledu smanjenja refleksija jer kabl u suštini nije idealan.

Poseban slučaj delila tzv. Gaborovo delilo dobija se kada se uzme da je otpor niskonaponske grane beskonačan. Tada se za $R_2 \rightarrow \infty$ iz jednačine (707) za odnos deljenja ovakvog delila dobija:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\sqrt{L}} = \frac{R_1 + R_3}{R_3} \quad (709)$$

Šema Gaborovog delila sa priključkom na oscilograf data je na slici 271 gde se vidi da se priključak za oscilograf može uzeti sa bilo koje tačke na završnom otporu. Naime, završni otpor



sl. 271

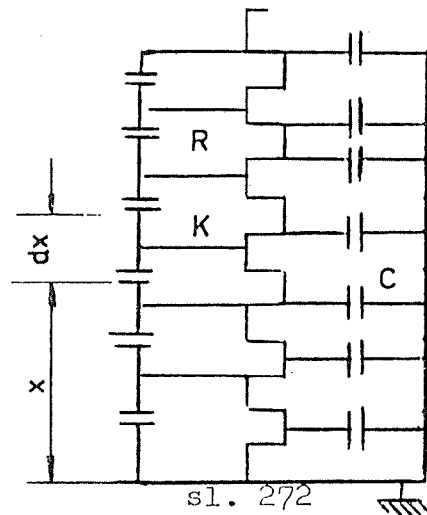
se najčešće izrađuje sa više izvoda za priključak pločica oscilografa i isti se koriste radi promene ulaznog napona u oscilograf.

Pri izradi otpornika za delila napona teži se da ovi otpornici imaju što manju induktivnost. To se postiže bifilarnim ili sličnim motanjem otporne žice. Ovakvi načini motanja smanjuju induktivnost ali stvaraju parazitne kapacitete između pojedinih delova otpornika. Isto tako otpornik zbog svojih prostornih dimenzija ima izvestan kapacitet u odnosu na zemlju. Ta vrednost kapaciteta se može izračunati kao kapacitet vertikalnog provodnika dužine l i poluprečnika r izraženih u m, prema obrascu:

$$C = \frac{111 l}{2.1 \ln \frac{l}{r} - 1,1} 10^{-6} \quad (\mu F) \quad (710)$$

Ekvivalentna šema otpornog delila kod koga su uzeti u obzir i ovi parazitni kapaciteti data je na slici 272 gde K

predstavlja ukupni kapacitet između delova motanog otpornika a C ukupni kapacitet prema zemlji izračunat po gornjem obrascu. Ako na ovakvu šemu delila primenimo Hevisajdovu funkciju amplitude U_0 raspodelu napona u početnom trenutku kada se op-



terećuju samo kapaciteti naći ćemo na osnovu sledećeg razmatranja. Na rastojanju x od uzemljenog kraja na elementu dx mogu se kao i kod raspodele napona duž transformatora napisati sledeće jednačine:

$$Q = \frac{K}{dx} \ell du$$

$$dQ = \frac{C}{\ell} dxU$$

iz kojih se dobija diferencijalna jednačina:

$$\frac{d^2U}{dx^2} = \alpha^2 U \quad \text{gde je } \alpha^2 = \frac{C}{K\ell^2}$$

čije je opšte rešenje:

$$U = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x}$$

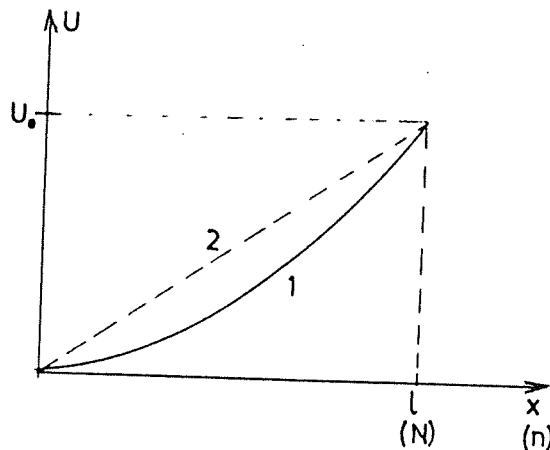
Za određivanje konstanti A i B granični uslovi su:

za $x=0$ $U=0$ i za $x=l$ $U=U_0$
 Zamenom graničnih uslova i posle određivanja konstanti A i B
 za raspodelu napona duž delila se dobija:

$$U = U_0 \frac{e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}}{e^{\alpha l} - e^{-\alpha l}} = U_0 \frac{\text{Sh } \alpha x}{\text{Sh } \alpha l} \quad (711)$$

Izgled ove krive dat je na slici 273 kao puna linija (kriva 1).
 Posle dovoljno dugog vremena i prelaznog procesa koji za šemu
 na slici 272 ima aperiodičan karakter, raspodela napona duž de-
 lila postaje linearna (prava 2 na slici 273) i data je izrazom:

$$U = U_0 \frac{x}{l} \quad (712)$$



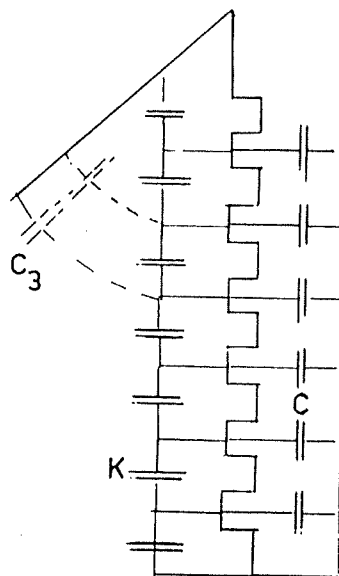
sl. 273

Ukoliko se delilo sastoji iz ukupno N sekcija napon na n-tom
 delu od uzemljenog kraja može se izraziti preko jednačine:

$$U = U_0 \frac{\text{Sh } \alpha \frac{n}{N}}{\text{Sh } \alpha} \quad (713)$$

Očigledno je da napon na niskonaponskom delu delila
 nije srazmeran, kako u početnom trenutku tako i kasnije, ulaz-
 nom naponu na visokonaponskom delu. Da bi se ovo korigovalo
 vrši se kompenzacija delila. To se postiže na taj način što

se za ulazni kraj delila veže metalni ekran čime se stvara dodatni kapacitet između ekrana i stuba delila (vidi sliku 274).



sl. 274

Kroz ovaj dodatni kapacitet C , opterećuje se kapacitet C prema zemlji a ne preko rednog kapaciteta K . Time se postiže da se početna raspodela približava linearnoj. Kako se radi o relativno malim kapacitetima, naročito prema zemlji, to se podesnim izborom veličine i oblika ekrana može postići i takozvana prekompenzacija tj. kada je dodatni kapacitet ekrana veći no što je za kompenzaciju potrebno.

Ovakvo omsko delilo kod koga je izvršena kompenzacija, koje može biti tačnije u pogledu merenja odnosno karakteristika delila o kojima će biti reči kasnije, naziva se kompenzovano omsko delilo.

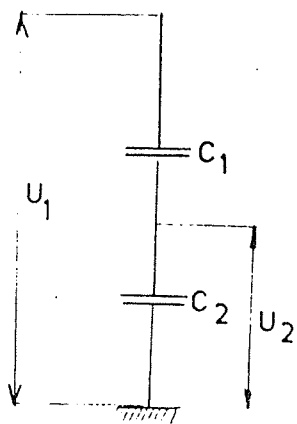
5. 2 Kapacitivna delila su delila kod kojih se i visokonaponska i niskonaponska grana sastoji od redno vezanih kapaciteta. Ako na ovakvo delilo premaslici 275 koje na strani niskog napona nema nikakvog opterećenja priključimo napon na redno vezane kapacitete C_1 i C_2 dobićemo za odnos napona sledeću simboličnu jednačinu:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (714)$$

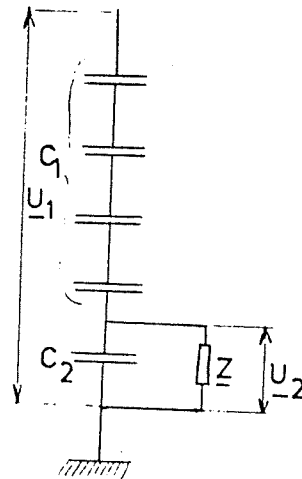
iz koje sledi da je odnos između visokog i niskog napona konstantan, bez obzira na vrstu i oblik napona, kada delilo radi

u praznom hodu.

Kapacitivna delila napona nisu podesna za merenje jednosmernih napona kada na niskonaponsku stranu treba priključiti kakav instrument, otporni ili kapacitivni, jer pokazivanje instrumenta neće biti adekvatno, pogotovu ako se jednosmerni napon menja u toku vremena.



sl. 275



sl. 276

Kada se za merenje naizmeničnih napona na niskonaponsku stranu delila priključi kakav merni instrument čija je impedansa \underline{Z} , može se za sistem prema slici 276 napisati sledeća jednačina:

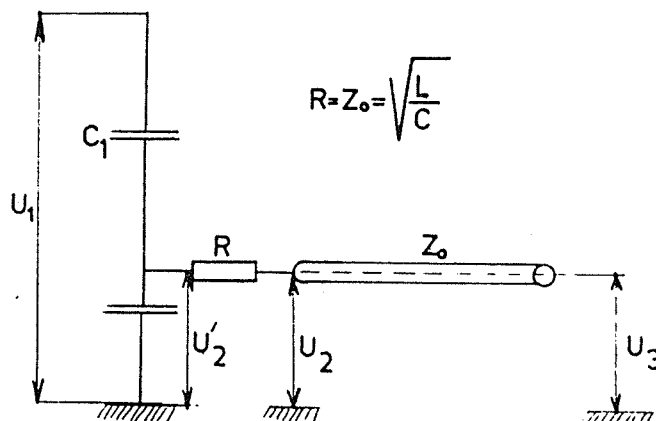
$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} - j \frac{1}{\omega C_1 \underline{Z}} \quad (715)$$

I ovde postoji fazni pomeraj izmedju napona U_1 i U_2 ali je i odnos deljenja delila zavistan od učestanosti. Da bi se ova zavisnost eliminisala potrebno je da impedansa instrumenta bude kapacitivna. To se može ostvariti ako se za merenje upotrebi oscilograf ili još bolje elektrostatički voltmetar čija je impedansa $\underline{Z} = \frac{1}{j\omega C}$. Tada se za odnos napona, odnosno odnos deljenja delila dobija:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2 + C}{C_1} \quad (716)$$

koji mnogo ne odstupa od odnosa deljenja pri praznom hodu jer je kapacitet elektrostatičkog voltmetra ili pločica oscilografa veoma mali u odnosu na kapacitet C_2 delila sa kojim je paralelno vezan.

Kapacitivno delilo za merenje udarnih napona najčešće se vezuje prema slici 277 gde je koaksijalni kabl otvoren na kraju a na početku je između njega i delila vezan redno otpor



sl. 277

R ravan karakterističnoj impedansi kabla. Za slučaj kada je kabl otvoren na kraju izveli smo jednačine (690) i (692) za napone i struje u obliku:

$$U_2 = U_3 \frac{e^{+rl} + e^{-rl}}{2} \quad (690)$$

$$I_2 = \frac{U_3}{Z_0} \frac{e^{+rl} - e^{-rl}}{2} \quad (692)$$

Na osnovu slike 277 mogu se napisati sledeće simboličke jednačine:

$$U_1 = U_2' + \frac{1}{C_{1p}} (U_2' C_{2p} + I_2) \quad (717)$$

$$U_2' = U_2 + R I_2 \quad (717)$$

koje kada se urede daju:

$$U_1 = U_2 \frac{C_1 + C_2}{C_1} + I_2 \frac{Rp(C_1 + C_2) + 1}{C_1 p} \quad (718)$$

Zamenom vrednosti za U_2 i I_2 iz jednačina (690) i (692) i vodeći računa da je $R = Z_0$ za odnose napona dobija se simbolična jednačina:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\delta l} = \frac{2R(C_1 + C_2)p + 1 - e^{-2\delta l}}{2RC_1 p} \quad (719)$$

Ako se izraz $e^{-2\delta l}$ u brojiocu prethodne jednačine razvije u red i uzmu samo prva dva člana:

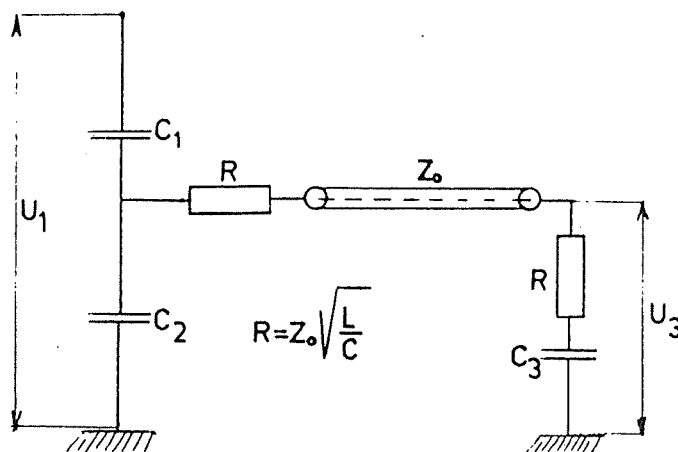
$$e^{-2\delta l} = 1 - 2\delta l + \dots \quad (720)$$

pa to zameni u jednačinu (719) i zamenivši da su $\delta = p\sqrt{LC}$; $R = \sqrt{\frac{L}{C}}$, kada se uredi dobija se:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\delta l} = \frac{C_1 + C_2 + Cl}{C_1} \quad (721)$$

gde je Cl ukupni kapacitet koaksijalnog kabla. Dobija se da je odnos deljenja delila konstantan. Pri ovome se čini mala greška ako je ukupni kapacitet kabla mnogo manji od kapaciteta $C_2 + C_1$ delila, što je najčešće slučaj, jer odnos deljenja delila malo odstupa od odnosa deljenja pri praznom hodu.

Može se pokazati da ovaj odnos deljenja dat jednačinom (721) odgovara odnosu deljenja u ustaljenom režimu ako se u jednačini (719) potraži granična vrednost desne strane za $p \rightarrow 0$. Ako se pak potraži granična vrednost desne strane iste jednačine za $p \rightarrow \infty$ dobiće se odnos deljenja u početnom trenutku koji je jednak sa odnosom deljenja u praznom hodu tj. $\frac{(C_1 + C_2)}{C_1}$.



sl. 278

Burch je predložio šemu veza kapacitivnog delila napona prema slici 278 kod koje odnos deljenja delila iznosi:

$$\frac{U_1}{U_3} = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C\ell}{C_1} \quad (722)$$

i isti je u početnom trenutku i u ustaljenom stanju ako je ispunjen uslov da je:

$$C_1 + C_2 = C_3 + C\ell \quad (723)$$

gde su C_1 i C_2 kapaciteti delila, C_3 kapacitet vezan na red sa završnim otporom i $C\ell$ ukupni kapacitet koaksijalnog kabla. Završni otpor R i redni otpor R , vezan između koaksijalnog kabla i delila, jednaki su karakterističnoj impedansi kabla.

5.3 Mešovita delila napona sastoje se od kombinacije omskih otpora i kapaciteta. Pri tome mogu omski otpori i kapaciteti u jednoj grani delila biti vezani paralelno ili redno te se razlikuju dve vrste mešoviti delila, paralelnog i rednog tipa. Najprostije mešovito delilo paralelnog tipa dato je na slici 279 za koje se u režimu praznog hoda mogu postaviti sledeći odnosi simboličnom jednačinom:

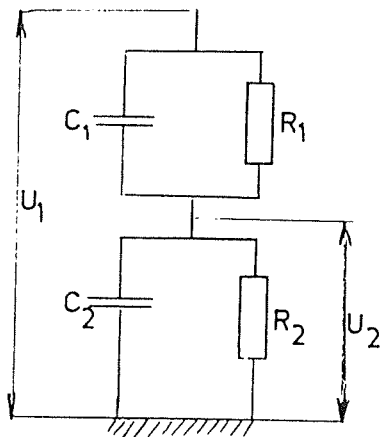
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\frac{R_1}{R_1 C_1 p + 1} + \frac{R_2}{C_2 R_2 p + 1}}{\frac{R_2}{C_2 R_2 p + 1}} \quad (724)$$

iz koje je očigledno da odnos deljenja neće biti zavistan ni od vremena ni od učestanosti ako je ispunjen uslov da je:

$$C_1 R_1 = C_2 R_2 \quad (725)$$

u kom slučaju odnos deljenja postaje:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad \text{odnosno zamenom uslova} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (726)$$

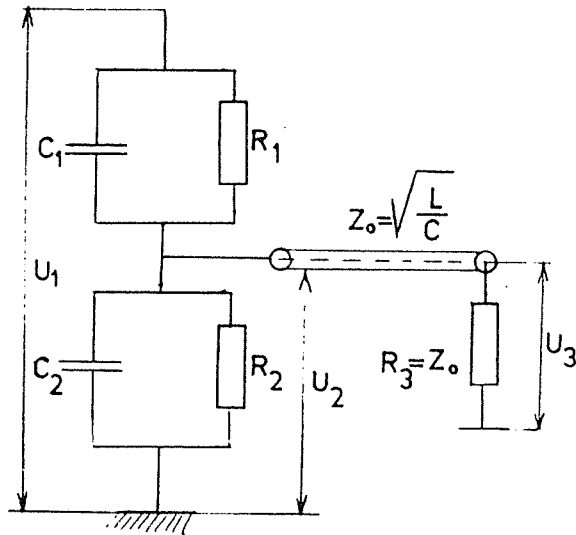


sl. 279

Očigledno je da pri merenju jednosmernog ili naizmeničnog napona otpor odnosno kapacitet instrumenta ulaze u vrednosti R_2 odnosno C_2 tako da bude ispunjen uslov dat jednačinom (725).

Kod merenja udarnih napona potrebno je da koaksijalni kabl bude završen karakterističnom impedansom. Za šemu na slici 280, vodeći računa o jednačinama (693) i (695) jer imamo završni otpor, može se napisati sledeća simbolična jednačina za odnose napona:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\gamma l} = \frac{Z_0 R_1 R_2 (C_1 + C_2) p + Z_0 (R_1 + R_2) + R_1 R_2}{(R_1 C_1 p + 1) Z_0 R_2} \quad (727)$$



sl. 280

Ova jednačina se može uz $Z_0 = R_3$ napisati u sledećem sredjenom obliku:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\gamma l} = \frac{R_2 R_3 (R_1 C_1 p + 1) + R_1 (R_2 + R_3) \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_2 p + 1 \right)}{R_2 R_3 (R_1 C_1 p + 1)} \quad (728)$$

Iz koje se vidi da će odnos deljenja delila biti stalan i nezavistan od vremena i učestanosti ako je ispunjen uslov da je:

$$R_1 C_1 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C_2 \quad (729)$$

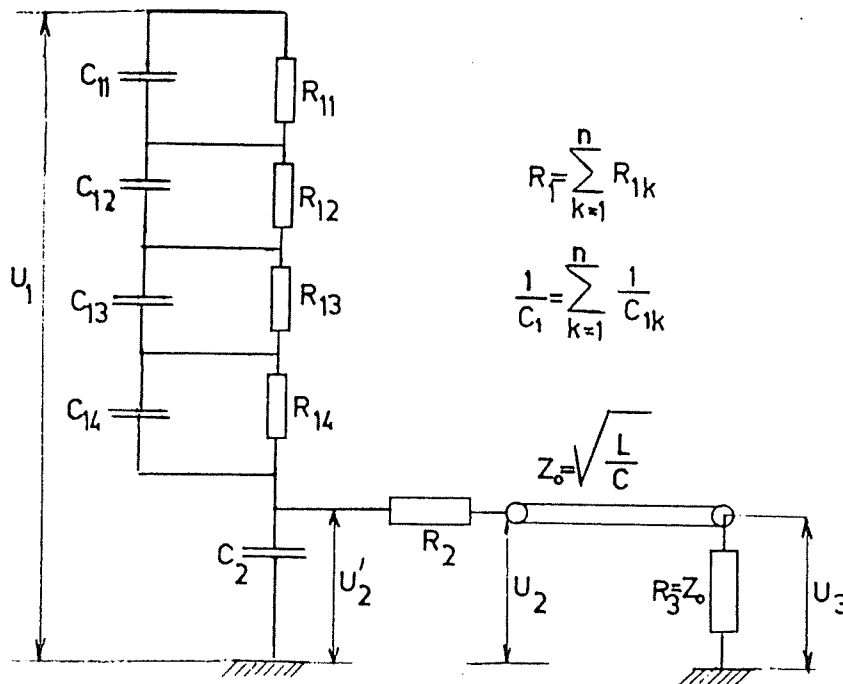
što u suštini odgovara jednačini (725) kada su R_2 i R_3 paralelno vezani. Odnos deljenja delila je tada:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\gamma l} = \frac{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}{\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}$$

odnosno:

$$\frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2 R_3} \quad (730)$$

Mešovito delilo paralelnog tipa slično kao i prethodno dato je na slici 281 gde je otpor R_2 vezan ispred koaksijalnog kabla umesto paralelno sa kapacitetom C_2 , a završni otpor R_3 jednak karakterističnoj impedansi kabla vezan je na kraju kabla. Visokonaponsku granu delila sačinjavaju niz paralelno ve-



sl. 281

zanih otpora i kapaciteta koji takodje ispunjavaju uslov da je:

$$R_{11} C_{11} = R_{12} C_{12} = \dots = C_1 R_1 \quad (731)$$

Za ovakvu šemu sa ekvivalentnim C_1 i R_1 za visokonaponsku granu može se za odnos napona U_1 i U_3 napisati sledeća simbolička jednačina vodeći računa da je kabl završen otporom ravnim karakterističnoj impedansi:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\gamma l} = \frac{(R_1 C_1 p + 1)(R_2 + R_3) + R_1 [C_2 (R_2 + R_3) p + 1]}{R_3 (C_1 R_1 p + 1)} \quad (732)$$

Iz ove jednačine se vidi da će odnos deljenja delila biti stabilan i nezavistan od vremena i učestanosti ako je:

$$R_1 C_1 = C_2 (R_2 + R_3) \quad (733)$$

što u suštini odgovara jednačini (725) i dopunjava jednačinu (731). Odnos deljenja delila u ovome slučaju iznosi:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\sqrt{\rho} l} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{R_3} \quad (734)$$

Mešovito delilo rednog tipa u praznom hodu dato je na slici 282 za koje se može postaviti sledeća simbolična jednačina:

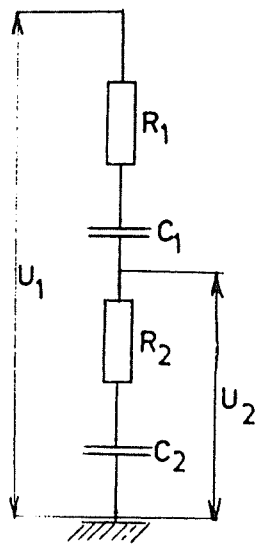
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\frac{R_1 C_1 p + 1}{C_1 p} + \frac{R_2 C_2 p + 1}{C_2 p}}{\frac{R_2 C_2 p + 1}{C_2 p}} \quad (735)$$

Ako se usvoji uslov da je $R_1 C_1 = R_2 C_2$ za odnos deljenja se dobija konstantna vrednost:

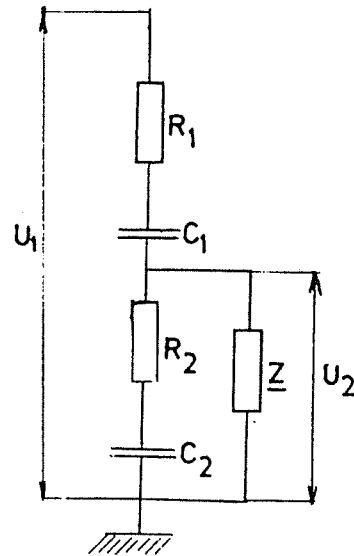
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (736)$$

Kada je na niskonaponskom delu ovakvog delila priključen kakav instrument radi merenja, bilo kod naizmeničnog ili jednosmernog napona, može se prema šemi na slici 283 napisati sledeća simbolična jednačina, gde impedansa Z predstavlja impedansu veza i mernog instrumenta:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2 (R_1 C_1 p + 1) + R_1 (R_2 C_2 p + 1 + \frac{R_2}{Z})}{R_2 (R_1 C_1 p + 1)} \quad (737)$$



sl. 282



sl. 283

Ako je impedansa mernog instrumenta veoma velika u odnosu na otpor R_2 tj. ako je $R_2/Z \ll 1$ te se ovaj odnos može zanemariti u odnosu na jedinicu, i ako je ispunjen uslov da je $R_1C_1 = R_2C_2$ za odnos deljenja se dobija:

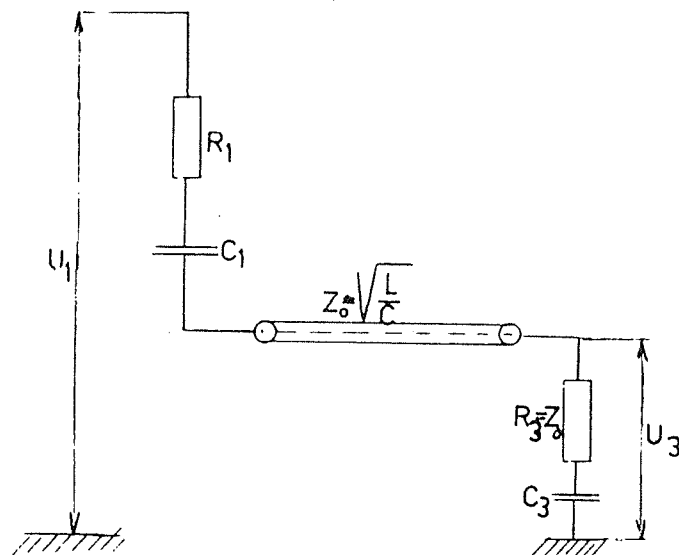
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (738)$$

Za merenje udarnih napona jedna od šema je i šema tzv, Gaborovog delila data na slici 284. Za ustaljeni režim ova veza daje odnos deljenja delila u iznosu:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\delta t} = \frac{C_1 + C_3 + c\ell}{C_1} \quad (739)$$

dok se za početni trenutak dobija:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\delta t} = \frac{R_1 + R_3}{R_3} = \frac{C_1 + C_3}{C_1} \quad (740)$$

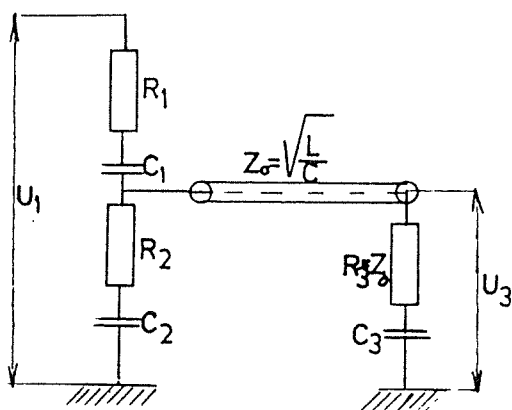


sl. 284

pri čemu je potrebno da su ispunjeni uslovi da je $R_1 C_1 = R_3 C_3$ i $R_3 = Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$. Vidimo da se odnosi deljenja razlikuju samo za ukupni kapacitet kabla $C\ell$ koji je najčešće veoma mali u odnosu na kapacitete $C_1 + C_3$, te je greška zanemarljiva.

Na slici 285 data je šema Lurch-ovog delila kod koга se uz ispunjene uslove da su: $R_1 C_1 = R_2 C_2 = R_3 C_3$ i $Z_0 = R_3$ za odnos deljenja u ustaljenom režimu dobija:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\gamma \ell} = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C\ell}{C_1} \quad (741)$$



sl. 285

a u početnom trenutku:

$$\frac{U_1}{U_3} e^{-\beta l} = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{C_1} \quad (742)$$

I ovde je potrebno da ukupni kapacitet koaksijalnog kabla C_Q bude što manji u odnosu na $C_1 + C_2 + C_3$, što je najčešće slučaj.

5. 4 Karakteristične veličine delila napona

Pored već navedene karakteristične veličine za delila napona koju smo nazvali odnos deljenja delila napona, a koja predstavlja odnos visokog prema niskom naponu ima i drugih karakteristika koje u neku ruku određuju kvalitet delila napona. Da bi objasnili ove karakteristične kriterijume navedimo da smo do sada sve vrste delila posmatrali dosta idealizovano. Naime, kod sva četiri napred navedena oblika delila napona postoje i parazitne impedanse koje do sada nismo uzimali u obzir. Ove parazitne impedanse utiču na tačnost delila. Ove parazitne impedanse u opštem slučaju sačinjavaju redne induktivnosti koje se javljaju i kod otpornika i kod kondenzatora, kao i kapaciteti samoga delila prema zemlji i okolnim uzemljenim i neuzemljenim objektima. Ovakve parazitne impedanse postoje čak i kod kompenzovanih delila, jer kompenzacija ne može biti idealna i potpuna.

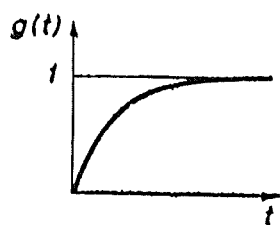
Osim toga mi smo pri ranijim razmatranjima uzimali da je koaksijalni kabl idealan tj. zanemarivali smo njegov omski otpor i njegovu odvodnost, ali sigurno je da kod stvarnog kabla ove veličine, iako male, postoje i donekle utiču na tačnost merenja naročito kod brzo promenljivih pojava kao što su udarni naponi. Isto tako i sam merni instrument sa svojim karakteristikama utiče na tačnost merenja.

Da bismo došli do kriterijuma o kvalitetu delila napona, možemo delilo napona zajedno sa svim priključenim elementima koji sadrže sve napred pomenute parazitne impedanse posmatrati kao jedan četvorokrajnik. Na ulaz ovoga četvorokrajnika primenjen je napon proizvoljnog oblika i treba odrediti napon na njegovom izlazu. Određivanje napona na izlazu može se izvršiti na dva načina.

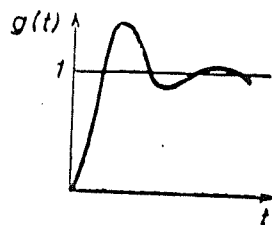
5. 4. 1 Jedan način bazira na činjenici da se napon ma kakvog oblika može rastaviti na niz napona pravougaonog čela, čija je

amplituda ravna jedinici (jedinični pravougaoni napon koji je definisan jedinичnom Hevisajdovom funkcijom). Ako se poznaje kako ovakav jedinичni pravougaoni napon prolazi kroz četvorokrajnik tj. ako se zna kakav će se napon imati na izlazu četvorokrajnika pri primeni jedinичnog pravougaonog napona na ulazu, može se primenom Duhamelovog integrala doći do toga kakav će se napon imati na izlazu četvorokrajnika pri primeni na ulaz napona ma kakvog oblika.

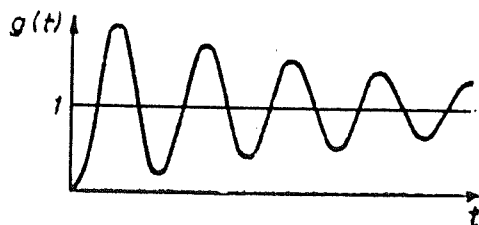
Kada se na ulaz četvorokrajnika priključi jedinичni napon pravougaonog oblika, napon koji se dobija na izlazu četvorokrajnika naziva se jedinичni odziv. Ova veličina je data kao funkcija vremena $g(t)$ i teorijski traje beskonačno mada se praktično njeno proučavanje može ograničiti na kraće vreme, već prema potrebi pojedinih slučajeva. Jedinичni odziv zadržava izvesnu konstantnu vrednost u prilično širokom opsegu i stoga se obično izražava u bezdimenzionalnom obliku uzimajući ovu konstantnu vrednost za jedinicu. Na slici 286 dato je nekoliko primera krivih jedinичnog odziva, koje se inače mogu dobiti i detaljnom matematičkom analizom uzimajući sve ekvivalentne elemente četvorokrajnika.



a



b



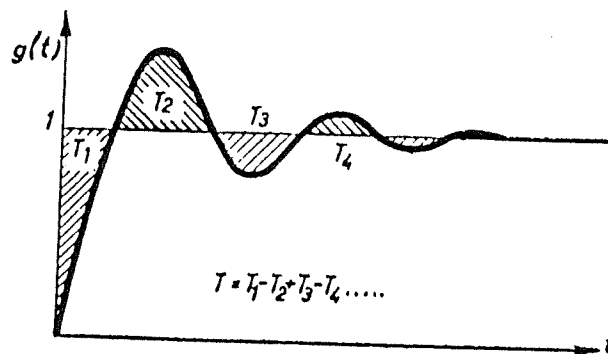
c

Jedinični odziv karakterišu sledeće veličine:

a) vreme odziva T je algebarski zbir površina iznad i ispod prave sa amplitudom ravnoj jedinici (vidi sliku 287) i ima dimenziju vremena. Matematički se vreme odziva može definisati na sledeći način:

$$T = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt \quad (743)$$

što odgovara šrafiranoj površini na slici 287.



sl. 287

b) učestanost odziva f_r koja se dobija iz vremena trajanja jedne oscilacije kada odziv ustaljenu vrednost postiže oscilatorno kao na slici 286c.

Za poznatu konfiguraciju četvorokrajnika vreme odziva se može izračunati na sledeći način. Naime, simbolički izrazi za napone na ulazu i izlazu četvorokrajnika vezani su sledećom relacijom:

$$U_2(p) = U_1(p) F(p) \quad (744)$$

gde je $F(p)$ simbolička prenosna funkcija koja zavisi od parametara četvorokrajnika.

Ako se na ulaz četvorokrajnika primeni Hevisajdova jedinična funkcija gornja jednačina prelazi u:

$$G(p) = \frac{1}{p} F(p) \quad (745)$$

gde je $G(p)$ simbolička funkcija jediničnog odziva $g(t)$ a $1/p$ je Laplasova transformacija Hevisajdove jedinične funkcije.

Laplasova transformacija izraza $q(t) = [1 - g(t)]$ biće:

$$Q(p) = \frac{1}{p} [1 - F(p)] \quad (746)$$

Podsetimo se da funkcija $g(t)$ posle dovoljno dugog vremena postaje konstantna, znači za ustaljeni režim $p \neq 0$, funkcija $G(o)$ postaje $1/p$ pa je prema obrascu (745) funkcija $F(o)$ ravna 1.

Ako sada funkciju $F(p)$ razvijemo u red po Maklorenu u okolini tačke $p=0$ dobija se:

$$F(p) = 1 + Ap + Bp^2 + Cp^3 + \dots \quad (747)$$

te se za funkciju $Q(p)$ dobija:

$$Q(p) = \frac{1}{p} (1 - 1 - Ap - Bp^2 - Cp^3 - \dots) = -(A + Bp + Cp^2 + \dots) \quad (748)$$

Iz ovih jednačina sledi da je:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial p}\right)_{p=0} = A \quad \text{i} \quad Q(p)_{p=0} = Q(o) = -A \quad (749)$$

odnosno:

$$Q(o) = -\left(\frac{\partial F}{\partial p}\right)_{p=0} \quad (750)$$

Po definiciji Laplasove transformacije $Q(p)$ iznosi:

$$Q(p) = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] e^{-pt} dt \quad (751)$$

što za vrednost $p=0$ daje:

$$Q(0) = \int_0^{\infty} [1 - g(t)] dt \quad (752)$$

Ovaj izraz je potpuno identičan sa izrazom datim jednačinom (743) kojom je definisano vreme odziva. Dakle, izraz $Q(0)$ predstavlja vreme odziva te se na osnovu jednačine (750) može vreme odziva izračunati iz izraza:

$$T = - \left(\frac{\partial F}{\partial p} \right)_{p=0} \quad (753)$$

Poznato je da kada se više četvorokrajnika veže na red da se njihove simboličke prenosne funkcije množe. Vreme odziva ovako složenih četvorokrajnika se dobija iz:

$$T_{uk} = - \frac{d \left[F_1(p) F_2(p) F_3(p) \dots \right]}{dp} \Big|_{p=0} = - \left[F_1'(p) F_2(p) F_3(p) \dots + F_2'(p) F_1(p) F_3(p) \dots \right] \quad (754)$$

Kako su funkcije $F_1(p)$; $F_2(p)$ za $p=0$ ravne jedinici to je ukupno vreme odziva:

$$T_{uk} = - F_1'(0) - F_2'(0) - F_3'(0) - \dots = T_1 + T_2 + T_3 + \dots \quad (755)$$

tj. vreme odziva više na red vezanih četvorokrajnika dobija se kao algebarski zbir vremena odziva pojedinih četvorokrajnika.

Posmatrajmo to na jednom primeru koji smo već obradili. Jednačina (703) daje odnos napona kod omskog delila, gde je napon U_1 ulazna simbolična veličina a U_3 izlazna simbolička veličina:

$$U_3(p) = U_1(p) \frac{R_2}{CpR_1R_2 + R_1 + R_2} \quad (703)$$

a izraz:

$$\frac{R_2}{CpR_1R_2 + R_1 + R_2} = F(p) \quad (756)$$

predstavlja simboličku prenosnu funkciju za četvorokrajnik dat je na slici 269 bez otpora R_0 .

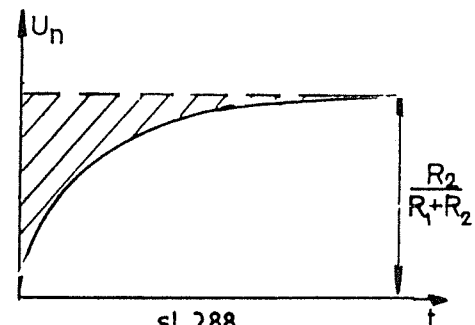
Vreme odziva izračunaćemo po obrascu (753)

$$T = - \left(\frac{\partial F(p)}{\partial p} \right)_{p=0} = - \frac{-CR_1R_2R_2}{\left[CpR_1R_2 + R_1 + R_2 \right]_{p=0}^2} = \frac{CR_1R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (757)$$

Konkretna funkcija gornje simboličke jednačine je glasila prema jednačini (704), pri primeni jedinične Hevisajdove funkcije:

$$u_3(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \text{ gde je } T_1 = \frac{R_1R_2C}{R_1 + R_2}$$

Ova funkcija u stvari predstavlja odziv ovoga četvorokrajnika koja postiže prema slici 288 konačnu vrednost za $t \rightarrow \infty$ ravnu $R_2/(R_1 + R_2)$. Šrafirana površina na slici 288 odgovara vremenu odziva i treba je izračunati prema izrazu:

$$T = \int_0^{\infty} \left[\frac{R_2}{R_1 + R_2} - u_3(t) \right] dt$$


$$T = \int_0^{\infty} \frac{R_2}{R_1 + R_2} e^{-\frac{t}{T_1}} dt = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{R_1R_2C}{R_1 + R_2} \quad (758)$$

Kako je konačnu vrednost uspostavljenog napona na slici 288 trebalo prema definiciji vremena odziva uzeti kao jedinicu,

to izračunate vrednosti u oba slučaja treba pomnožiti sa odnosom deljenja delila te se za vreme odziva dobija:

$$T = \frac{R_1 R_2 C}{R_1 + R_2}$$

Vreme odziva jednog stvarnog mernog sistema najbolje je izmeriti na samom tom sistemu. Merenje se vrši na taj način što se na merni sistem dovede napona pravougaonog oblika i na izlazu pomoću oscilografa snimi odziv na napon pravougaonog oblika. Time je dobiven odziv a iz njega se može izračunati vreme odziva. I sam oblik odziva je dobro poznavati da bi se moglo uočiti vreme posle koga odziv postiže praktično svoju ustaljenu vrednost. Teškoću pri snimanju odziva predstavlja dobijanje pravougaonog napona sa vrlo velikom (teorijski beskonačnom) brzinom uspostavljanja napona. Taj problem se rešava na razne načine (vidi lit.19,41) i praktično se mogu postići brzine uspostavljanja napona tako velike da pravougaoni napon postiže svoju maksimalnu vrednost posle vremena od reda jedne nano sekunde (10^{-9} sek).

5. 4. 2 Drugi način određivanja izlaznog napona na jednome četvorokrajniku, kada je na ulaz četvorokrajnika primenjen napon proizvoljnog oblika, bazira na činjenici da se svaki napon može prema Furijeovom redu rastaviti na niz harmonika, pa se za svaki harmonik odredi kako on prolazi kroz četvorokrajnik tj. odredi se promena amplitude i faznog stava svakog harmonika pri prolazu kroz četvorokrajnik.

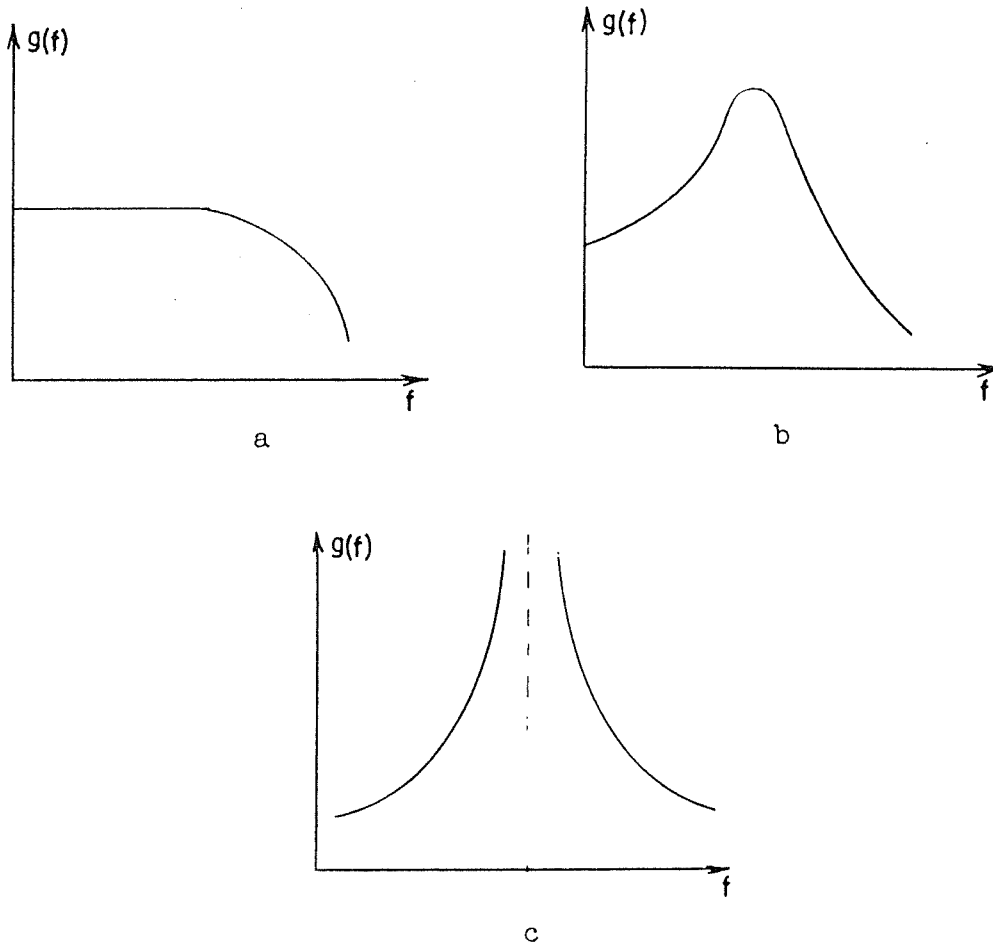
Kod mernih sistema, pa i onih koji sadrže delilo napona, definiše se frekventni odziv $G(f)$ kao izraz koji predstavlja izlaznu promenljivu veličinu kao funkciju frekvencije f kada se na ulaz četvorokrajnika priključi naizmenična sinusoidna promenljiva veličina amplitude ravne jedinici, a čija se frekvencija menja. Po pravilu frekvencija treba da se menja od nule do ∞ , ali se praktično ona može ograničiti do neke vrednosti u svakom konkretnom slučaju.

Frekventni odziv praktično ima konstantnu vrednost u širokom delu područja promene frekvencije i navodi se bez dimenzija u svedenom obliku $g(f)$ za koji je ta konstantna vrednost uzeta za jedinicu.

Na slici 289 a, b i c prikazani su frekventni odzivi sistema čiji su jedinični odzivi prikazani na slici 286 a, b

i c pri čemu je razmera za frekvenciju logaritamska.

Frekventni odziv, nazvan kadkad i frekventnom karakteristikom, snima se najčešće samo za odnose amplituda, jer su merni sistemi najčešće takvi da je fazno odstupanje minimalno.



sl. 289

Snimanje se vrši na taj način što se na ulaz četvorokrajnika priključi sinusoidni naizmenični napon i na izlazu se meri amplituda napona kao funkcija frekvencije, pri čemu se frekvencija menja od najniže do one koja je važna za napon koji će se ovakvim sistemom meriti.

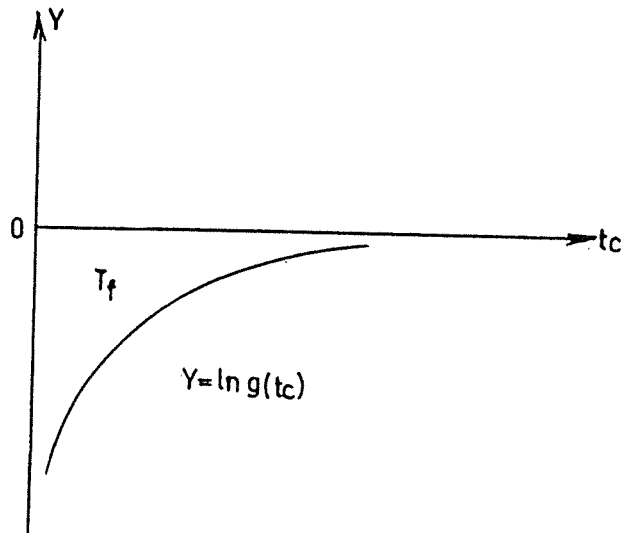
Frekventni odziv može da posluži da se iz njega izračuna vreme odziva. Naime ako se uvede vreme trajanja jedne periode kao $t_c = 1/f$ za frekventni odziv se dobija funkcija $g(t_c)$, pomoću koje se može uspostaviti veza između frekventnog odziva i jediničnog odziva. Naime ako se nacрта funkcija $y = \ln g(t_c)$, kako je to prikazano na slici 290, veza između ova dva odziva dobija se iz približne jednačine:

$$T = \frac{T_f}{\sqrt{2}} \quad (759)$$

gde su:

T_f - algebarski zbir površina izmedju osa i logaritma svedenog frekventnog odziva

T - vreme odziva



sl. 290

5. 4. 3 Greške pri merenju mernim sistemima koji sadrže delila napona nastaju usled pogrešno izmerenog odnosa deljenja delila, greške mernih instrumenata ali kod brzo promenljivih pojava greška može nastati i usled velike vrednosti vremena odziva. Ovo se najviše i najčešće manifestuje pri merenju udarnih napona odrezanih na čelu. Pri merenju udarnih napona odrezanih na čelu mogu nastati dve greške i to greška merenja u trenutku rezanja napona i greška merenja usled eventualnog povišenja oscilografisanog napona posle rezanja prouzrokovana mernim sistemom.

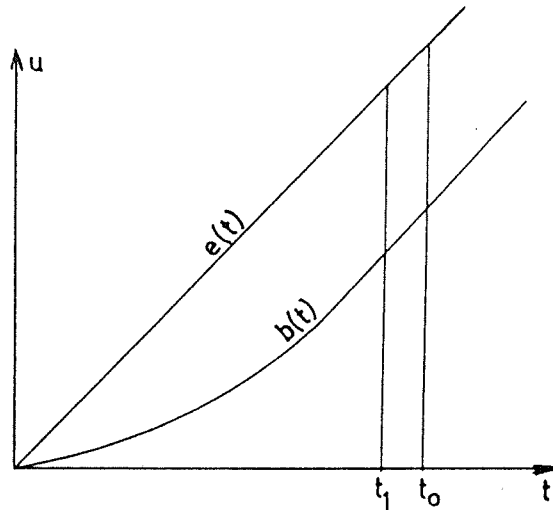
Da bi odredili grešku u trenutku rezanja napona uzmi-
mo da jedinični odziv mernog sistema ima izgled kao na slici
287 i neka je kriva koja predstavlja ovaj odziv data funkcijom
vremena $g(t)$. Rekli smo da se odziv istoga mernog sistema na
ma kakav drugi oblik napona može dobiti primenom Duhamelovog
integrala. Uzmimo jedan linearno rastući napon čiji je oblik
 $e(t) = Ut$ i primenimo Duhamelov integral u obliku:

$$b(t) = e(0)g(t) + \int_0^t e'(t - \tau)g(\tau) d\tau \quad (760)$$

Posle izračunavanja i smene dobija se odziv mernog sistema na linearno rastući napon:

$$b(t) = U \int_0^t g(t) dt \quad (761)$$

Nacrtajmo linearno rastući napon $e(t) = Ut$ i odziv mernog sistema na ovaj napon na istome dijagramu kako je to prikazano na slici 291. Linearno rastući napon je prava koja prolazi



sl. 291

zi kroz koordinatni početak a odziv mernog sistema dat jednačinom (761) predstavljaće jednu krivu liniju sve dotle dok jedinični odziv $g(t)$ ne dostigne svoju konačnu vrednost i ne postane ravno jedinici. Neka to, recimo, traje do nekog trenutka t_1 . Ovaj odziv se može za $t > t_1$ napisati u obliku:

$$b(t) = U \int_0^{t_1} g(t) dt + U \int_{t_1}^t g(t) dt = U \int_0^{t_1} g(t) dt + U(t - t_1) \quad (762)$$

Iz poslednje jednačine sleduje da ovaj odziv posle vremena t_1 postaje prava linija paralelna sa linearno rastućim naponom. Da bismo odredili grešku koja nastaje u amplitudi između primenjenog linearno rastućeg napona i odziva mernog sistema na ovaj napon posmatrajmo jedan trenutak $t_0 > t_1$ i načinimo procentualnu razliku između ova dva napona u tome trenutku:

$$\frac{Ut_0 - U \int_0^{t_0} g(t) dt}{Ut_0} \cdot 100 = \frac{\int_0^{t_0} [1 - g(t)] dt}{t_0} \cdot 100 \quad (763)$$

Kao što se vidi procentualna greška ne zavisi od amplitude napona U , a sa druge strane kako smo uzeli da je $t_0 > t_1$ to znači da je jedinični odziv već postigao svoju konačnu vrednost te integral u brojiocu predstavlja vreme odziva T , te je:

$$\delta_1 = \frac{T}{t_0} 100 \quad (764)$$

Kako se udarni napon može do trenutka rezanja smatrati linearno rastućim naponom, to ako je rezanje nastalo u trenutku T_s , procentualna greška u amplitudi prilikom rezanja iznosi:

$$\delta_1 = \frac{T}{T_s} 100 \quad (765)$$

Propisima je predviđeno da greška pri merenju amplituda udarnih napona rezanih na čelu ne sme biti veća od 5%, te vreme odziva delila kojim će se ovakvi naponi meriti mora biti $T \leq 0,05 T_s$.

Greška merenja usled eventualnog povišenja napona posle rezanja se u većini slučajeva praktično zanemaruje, ali njena procena se može izvesti odnosno utvrditi da li ista postoji ili ne, kao i od čega sve zavisi (vidi lit.19,41). Napomenimo samo da za ocenu ove greške treba poznavati krivu jediničnog odziva, njen nagib u početnom trenutku i vreme do rezanja.

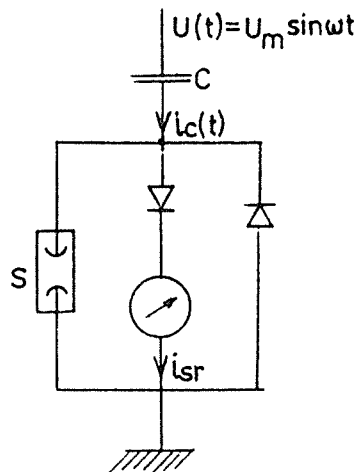
Na kraju da kažemo da se karakteristike mernih sistema a posebno delila napona mogu poboljšati boljom i kvalitetnijom izradom pojedinih elemenata. Kod delila to znači izradom bezinduktivnih otpornika i kondenzatora, a kompenzacija otpornih delila takodje poboljšava karakteristike delila, no ta poboljšanja treba svakako eksperimentalno proveriti.

G. Merenje temenih vrednosti napona primenjuje se kod merenja naizmeničnih i udarnih napona. Merenje temene vrednosti naizmeničnog napona mora se vršiti naročito u onim slučajevima kada nismo sigurni da se iz izmerene efektivne vrednosti napona može dobiti maksimalna (temena) vrednost prostim množenjem sa $\sqrt{2}$. Temena vrednost naizmeničnog napona merodavna je pri kratkotrajnim dielektrišnim naprezanjima (električni proboj) a efektivna pri dugotrajnim (termički proboj). Temenu vrednost naizmeničnog na-

pona treba meriti u svom onim slučajevima kada može doći do izobličenja sinusoide napona, na primer usled postojanja viših harmonika zbog nelinearnosti elementa kola.

6. 1 Temena vrednost naizmeničnog napona može se meriti metodom koju su predložili Chubb i Fortscue čiji je princip prikazan na slici 292. Na kondenzator kapaciteta C priključen je naizmenični napon i kroz njega protiče struja:

$$\underline{I_c} = j\omega CU \quad (766)$$



sl. 292

Srednja vrednost struje koja se meri instrumentom sa kretnim kalemom proporcionalna je temenoj vrednosti naizmeničnog napona, prema izrazu:

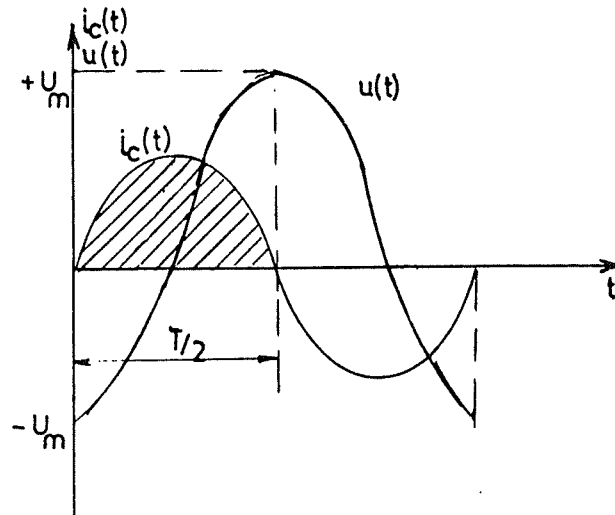
$$i_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i_c(t) dt \quad (767)$$

u koji se može uneti da je $i_c = C \frac{du}{dt}$ i zamenom granica integrala prema slici 293 dobija se:

$$i_{sr} = \frac{1}{T} \int_{-U_m}^{+U_m} C \frac{du}{dt} dt = \frac{1}{T} \int_{-U_m}^{+U_m} C du = \frac{C}{T} 2 U_m \quad (768)$$

pa je temena vrednost napona:

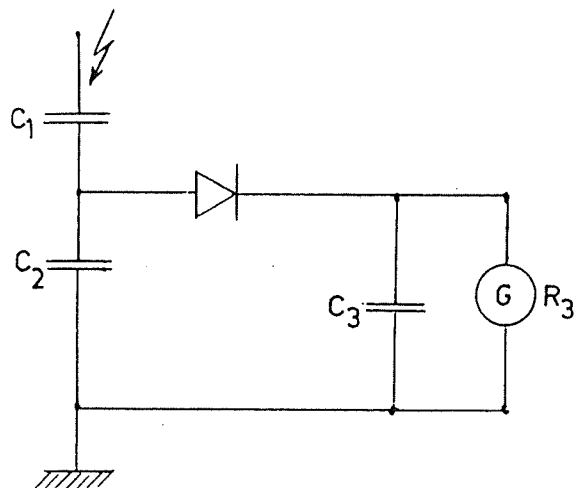
$$U_m = \frac{i_{sr} T}{2C} = \frac{i_{sr}}{2fC} \quad (769)$$



sl. 293

Na slici 292 jedan ispravljač služi za dobijanje struje i_{sr} a drugi za rasterećenja kondenzatora za vreme suprotnog polariteta. Pri izvođenju gornjih obrazaca pretpostavljeno je da ispravljač u propusnom smeru i instrument imaju zanemarljivo male otpore. Iskrište S vezano otočno služi za zaštitu ispravljača i instrumenta od previsokih napona.

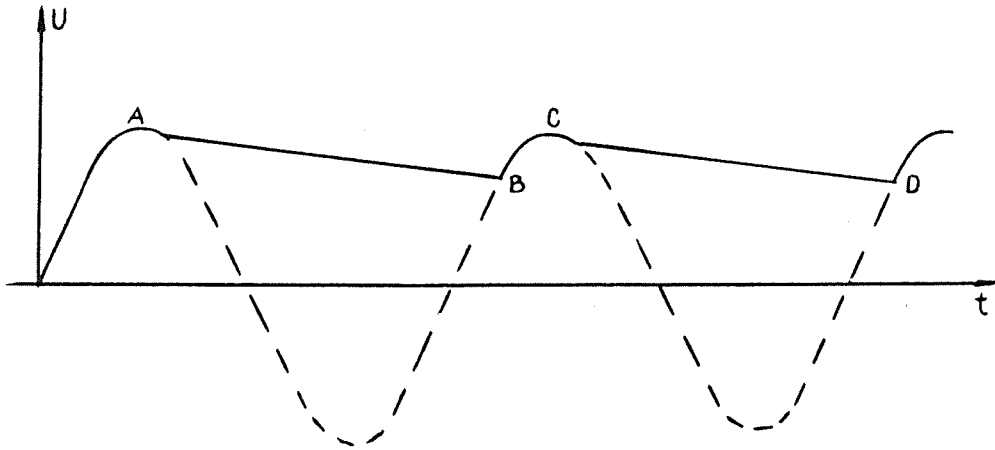
Na slici 294 data je šema za merenje temene vrednosti naizmeničnog napona preko kapacitivnog delila napona. Kondenza-



sl. 294

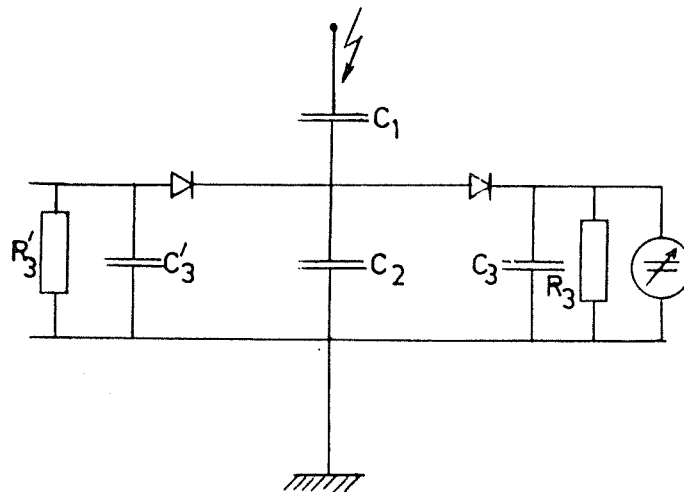
tor C_3 opterećuje se preko ispravljača do temene vrednosti napona ali se u vremenskim intervalima od A do B i od C do D rasterećuje preko otpora instrumenta R_3 po jednačini Ue^{-t/R_3C_3} te

instrumenat meri srednju vrednost napona datog na slici 295. Da bi greška bila što manja a da bi instrumenat mogao da prati eventualne lagane promene naizmeničnog napona obično se usvaja da vremenska konstanta rasterećenja $R_3 C_3$ bude reda jedne sekunde.



sl. 295

Greška pri merenju zavisi od učestanosti jer se promenom učestanosti naizmeničnog napona menja i vremenski interval rasterećenja kondenzatora C_3 . Grešku pri merenju unosi i rasterećenje kondenzatora C_3 preko ispravljača te se često paralelno sa kondenzatorom C_2 stavlja otpornik R_2 da odvede ovo opterećenje, no ovaj otpor utiče na karakteristiku delila napona.

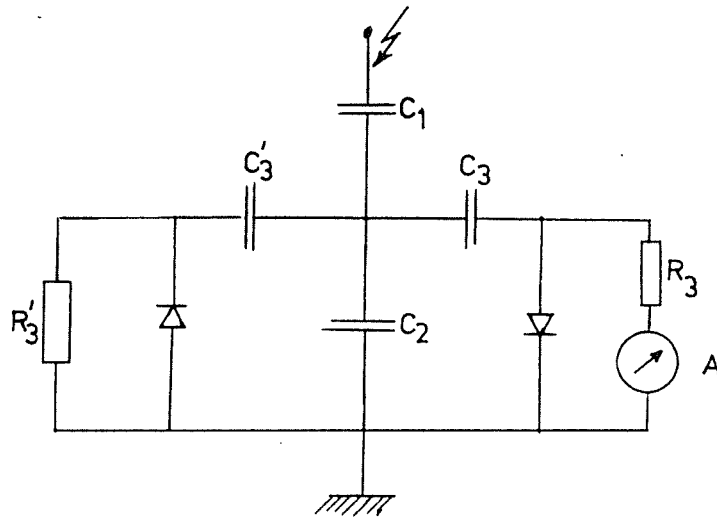


sl. 296

Na slici 296 data je šema prema Rabus-u koja ima dve simetrične grane a umesto instrumenta sa kretnim kalemom koris-

ti elektrostatički voltmetar. Ukoliko je naizmenični napon takav da mu poluperiode nisu simetrične može se i u drugoj grani priključiti elektrostatički voltmetar.

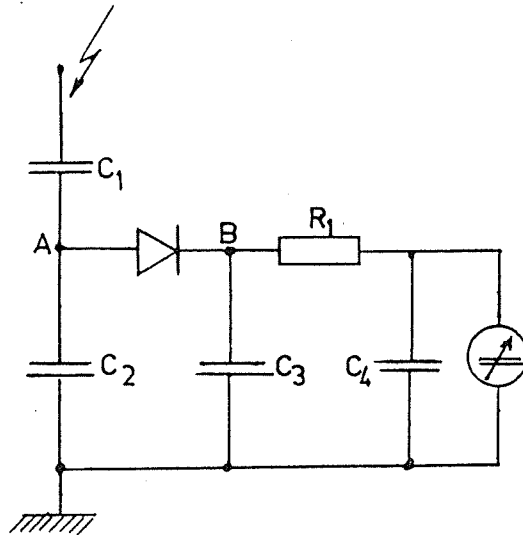
Firma Haefely kod svoga voltmetra temenih vrednosti naizmeničnog napona prema slici 297 izmenila je mesta ispravljača i kapaciteta C_3 i kao instrumenat koristi mikroampermetar sa velikom rednim otporom.



sl. 297

6. 2 Temena vrednost udarnog napona može se meriti pomoću oscilografa. Ako su pločice za vertikalni odklon oscilografa priključene direktno za izlazni kraj koaksijalnog kabla, koristeći bilo koje delilo napona, temena vrednost udarnog napona može se izračunati na sledeći način. Na oscilografu se snimi oblik udarnog napona i izmeri amplituda koja neka iznosi a cm. Poznajući osetljivost oscilografa s datu u V/cm, napon na pločicama oscilografa, odnosno na izlazu koaksijalnog kabla je $U_3 = as$ Volta. Vrednost amplitude visokog napona dobija se množenjem sa odnosom deljenja primenjenog delila napona. Ukoliko pločice oscilografa nisu direktno priključene na kraj koaksijalnog kabla već na nekom delu završnog otpora R_3 koaksijalnog kabla, treba napon dobiven proizvodom as svesti na napon ulaza u koaksijalni kabl. Ukoliko oscilograf upisuje liniju baždarenja horizontalnog odklona, napon na pločicama oscilografa treba izračunati iz odnosa izmerene amplitude i odklona linije baždarenja.

Na slici 298 data je šema uređaja pomoću koga se može direktno instrumentom očitati temena vrednost udarnog napona. Rabus je došao na ideju da se kondenzator C_3 opterećen preko ispravljača rasterećuje na kapacitet C_4 nešto sporije. Naime



sl. 298

napon sa niskonaponske grane delila, u principu bilo kog tipa delila, preko ispravljača sa malim otporom R_p u propusnom smeru opterećuje kondenzator malog kapaciteta C_3 tako da je vremenska konstanta $R_p C_3$ vrlo mala da bi napon na kapacitetu C_3 postigao vrednost što bližu temenoj vrednosti udarnog napona. Potrebno je da ova vremenska konstanta bude reda 10^{-8} sekunde da bi greška u promeni amplitude tačaka A i B bila reda 1% pri merenju stadardnih udarnih napona. Znači da i kondenzator C_3 mora imati malu vrednost (nekoliko desetina pF). Kada bi elektrostatički voltmetar bio direktno priključen za kondenzator C_3 tj. za tačku B, kondenzator C_3 bi se vrlo brzo rasteretio preko izolacionog otpora instrumenta i otpora ispravljača u zaprečnom smeru R_z . Uvodjenjem otpora R_1 dovoljne vrednosti da u vremenskom intervalu opterećenja kondenzatora C_3 kroz njega otekne u C_4 zanemarljivo malo opterećenje, postignuto je to da posle opadanja napona u tački A kondenzator C_3 deli svoje opterećenje sa znatno većim kondenzatorom C_4 opterećujući ovaj sa vremenskom konstantom:

$$T_1 = R_1 \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} \quad (770)$$

Kada se uspostavi isti napon na oba kondenzatora njihovo dalje rasterećenje je moguće preko otpora ispravljača u zaprečnom sme-

ru sa vremenskom konstantom:

$$T_2 = R_z(C_3 + C_4) \quad (771)$$

Vremenska konstanta T_2 se podesi na nekoliko stotina pa i hiljada sekundi, koje je vreme sasvim dovoljno za očitavanje instrumenta, elektrostatičkog voltmetra čiji je kapacitet uračunat u kapacitet C_4 .

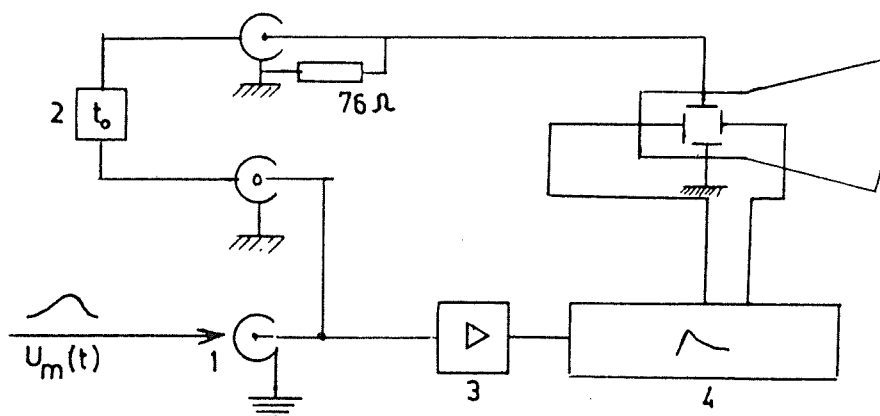
Tačnost ovakvih uređjaja iznosi do 3%, za rezane udarne talase, a pri punim udarnim talasima je i bolja. Kod udarnih napona rezanih na čelu greška se povećava ako je vreme do rezanja ispod 0,3 μ s.

Ovakvi uređjaji, pogotovu ako su snabdeveni registri-
rajućim instrumentom, su veoma podesni za brza i učestana merenja temenih vrednosti udarnih napona kod ispitivanja udarnim naponom.

7. Oscilografi se u tehnici visokog napona primenjuju za merenje brzo promenljivih pojava, napona i struja, najčešće u kombinaciji sa drugim aparatima, Pomoću njih se mogu utvrditi oblici napona i struja i izmeriti njihove amplitude.

Primenjuju se dve vrste oscilografa i to sa užarenom i sa hladnom katodom, mada ovi drugi dosta ređe.

Oscilografi sa užarenom katodom kao glavni element sadrže katodnu cev na čijem zastoru (ekranu) se dobija željena slika. Ne ulazeći u detalje konstrukcije ovakvih oscilografa daćemo samo neke osnovne karakteristične podatke za njih. Veliki anodni naponi katodne cevi, koji su reda 10 do 20 kV, omogućavaju velike brzine upisivanja koje se kreću i do 25000 km/s. Osetljivost ovakvih oscilografa se kreće od 50 do 100 V/cm, tako da se grade bez pojačavača te se naponi koji se njima mere obično dovode direktno na same odklonske pločice. To je povoljno jer su ulazni naponi dosta viši od eventualnih napona smetnji. Na slici 299 data je principijelna blok šema jednog ovakvog oscilografa. Napon koji se meri $u_m(t)$ dovodi se na jedan priključak oscilografa (1) odakle preko uređjaja za kašnjenje (2), koji je najčešće kakav koaksijalni kabl završen završnim otporom (76 oma), dolazi na vertikalne pločice oscilografa. Istovremeno pri ulasku na priključak (1) dovedeni napon preko pojačavača (3) ili direktno deluje na generator testerastog napona (4). Kako se u tehnici visokih napona najčešće primenjuju jednokratni impulsi struje ili napona to je potrebno da se na horizontalne plo-



sl. 299

čice oscilografa dovede samo jednom testerasti napon u tačno odredjenom trenutku, te se takav način stvaranja samo jednog impulsa testerastog napona često u literaturi naziva trigerovanje (od engleske reči Trigger).

Način pokretanja vremenske baze oscilografa tj. triggerovanje može biti izvršeno od strane samoga dolazećeg impulsa kako je to prikazano na slici 299 ili pak od strane kakvog nezavisnog izvora (poseban uređaj kao na slici 242 ili preko antene koja prihvata indukovane impulse usled reagovanja iskrišta udarnog generatora).

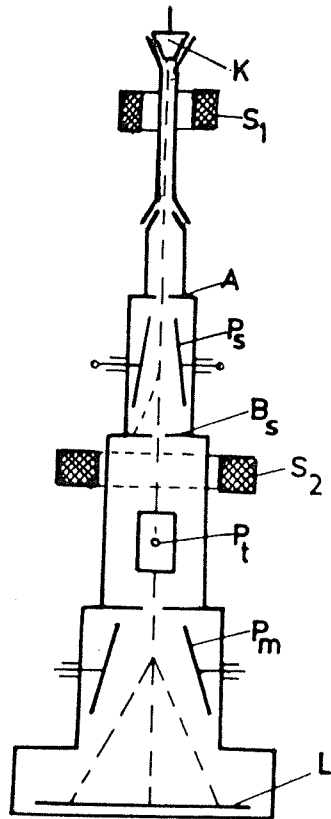
No bez obzira na način pobudjivanja (triggerovanja) oscilografa potrebno je izvesno vreme od nailaska impulsa za triggerovanje do pokretanja vremenske baze oscilografa koje je reda veličine 0,1 do 0,2 μ s. Za ovo vreme treba da zakasni merena pojava pre no što dospe na vertikalne pločice oscilografa. U tu svrhu primenjuje se uređaj za kašnjenje, najčešće koaksijalni kabl, čije vreme kašnjenja pojave treba da je bar reda veličine 0,1 do 0,2 μ s koliko je i napred navedeno tz. sopstveno vreme zakašnjenja oscilografa.

Vremenska baza oscilografa, odnosno testerasti napon koji se dovodi horizontalnim odklonskim pločicama, treba da je podesiv u skokovima od vremena trajanja 1 do 2000 pa čak i 5000 μ s.

Radi snimanja sa oscilografa najčešće se primenjuju

ekrani plave boje sa srednjim vremenima fluoresciranja.

Oscilografi sa hladnom katodom rade na sledećem principu (vidi sliku 300). U vakuumu se nalaze katoda K i anoda A na dovoljnom izolacionom rastojanju. Katoda je prema uzemljenoj anodi na visokom naponu koji se kod izvesnih konstrukcija kreće i do 100 kV. U vakuumu koji iznosi 10^{-1} do 10^{-2} Torra (mm Hg) usled visokog napona dolazi do autoelektronske emisije



sl. 300

sa katode. Snop elektrona biva koncentrisan u magnetnom polju kalema S_1 i prolazeći kroz otvor na anodi prolazi između pločica P_s koje služe za blokiranje ovog mlaza na taj način što ga skreću i onemogućavaju da prodje kroz otvor B_s . Na svome putu posle deblokiranja elektronski snop nailazi na drugi kalem S_2 za koncentraciju mlaza, pa na pločice P_t na koje se dovodi testerasti napon radi stvaranja vremenske baze. Pločice P_m služe za dovodjenje posmatrane pojave a L je ekran na kome se elektronski snop zaustavlja i opisuje posmatranu pojavu u funkciji vremena.

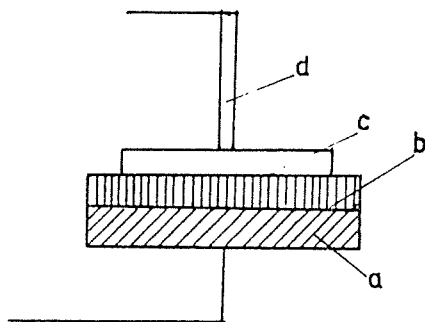
Izradjuju se najčešće kao oscilografi sa dva ili četiri elektronska snopa i brzina upisivanja im je i do 50000 km/sek.

Ulazni napon za posmatrane pojave može biti veoma visok, od 2 pa čak do 100 kV kod pojedinih tipova. Elektronski snop direktno deluje na film ili foto papir čija veličina može biti i 15 x 20 cm. Zbog rada u vakuumu potrebno je da postoje vakuum pumpe i to obično dve na red, da bi se postigao potrebni visoki vakuum.

Uz ovakav oscilograf kao pribor postoje: generator tes-

terastog napona za vremensku bazu, uređjaj za sinhronizaciju vremenske baze i posmatrane pojave, kao i potrebni uređjaji za napajanje kalema za koncentraciju elektronskog snopa, i napona za otklanjanje elektronskog snopa preko pločica P_S .

8. Klidonograf služi za merenje napona. Njime se najčešće mere udarni naponi mada mogu i naizmenični i jednosmerni. Ime mu dolazi od grčkih reči: klydonos - talas i graphein - pisati. Njime se mogu meriti amplituda, polaritet i donekle oblik udarnog napona. Sam klidonograf se prema slici 301 sastoji iz valjkaste metalne podloge a na koju se stavlja sloj izolacionog materijala b a na ovaj film ili foto papir c sa emulzijom na gore. Na film se naslanja šiljak d debljine nekoliko mili-

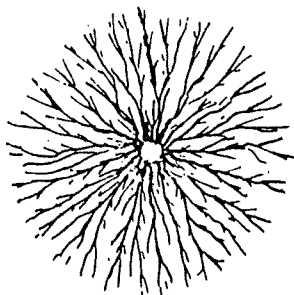


sl. 301

metara. Sve ovo stavlja se u posebnu kasetu od izolacionog materijala tako da samo krajevi elektroda a i d izlaze napolje. Kasetu mora biti dobro zatvorena da spreči prodiranje svetlosti i vlage. Ako se između krajeva a i d, kao elektroda, priključi dovoljno visok napon reda 2 do 20 kV nastaje jonizacija, tinjavo pražnjenje ili puzajuće pražnjenje. Ove pojave će na emulziji filma u zavisnosti od veličine napona, njegovog oblika i polariteta stvoriti figure slične Lihtenbergovim figurama. Na osnovu oblika i veličine ovih figura može se zaključiti o veličini, obliku i polaritetu primenjenog napona.

Kod udarnih napona jasno se razlikuju figure pozitivnog i negativnog napona tj. da li je na šiljku bio pozitivan ili negativan napon. Kada je napon pozitivan figure su za oko 2 do 3 puta veće no kod negativnog, za istu vrednost priključenog napona. To je svakako posledica ranije objašnjene činjenice da se pri pozitivnom šiljku pojačava električno polje u

dubini međuelektrodnog razmaka, kao i da je dužina kanala puzajućeg pražnjenja veća kod pozitivnih impulsa. Slika pozitivnog klidonograma ima zrake slične rasprostiranju grana koje se jasno raspoznaju. U zavisnosti od strmine talasa ili bolje rečeno od oblika talasa menja se uzajamni raspored i gustina ovih grana. Što je talas strmiji to su pravilnije i gušće ove grane i tim su bliže kružnom obliku. Veličina poluprečnika ovih figura srazmerna je amplitudi primenjenog napona (slika 302).



sl. 302

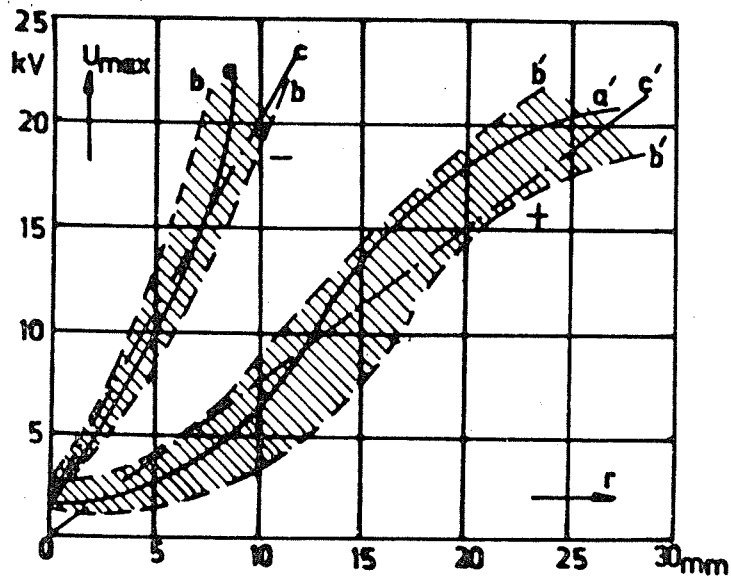


sl. 303

Kod negativnog klidonograma postoji niz tankih pravolinijskih zraka. Što je čelo talasa strmije to su ove linije gušće, a amplituda napona srazmerna je takodje radijusu ovih figura, slika 303.

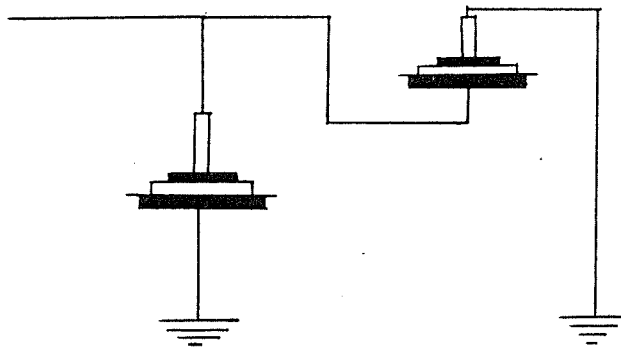
Kod naizmeničnog napona figura za istu vrednost primenjenog napona ima isti prečnik kao i kod pozitivnog talasa, ali se sastoji iz niza grana koje se međusobno ukrštaju jer je napon delovao više poluperioda.

Da bi se klidonografom mogla vršiti merenja treba isti pre upotrebe baždariti stavljanjem poznatih napona i merenjem veličine poluprečnika figure za te napone. Na taj način dobijaju se karakteristične krive za dotični klidonograf, koje imaju oblik dat na slici 304, gde se vidi da su rasipanja prilično velika. Na rasipanje vrednosti merenih klidonografom utiče čitav niz faktora kao što su: vlažnost i relativna gustina vazduha, električne karakteristike izolacionog materijala b, debljina izolacionog materijala, postojanje vazdušnih slojeva, kvalitet fotomaterijala itd. Neki od ovih faktora su konstantni za određeni klidonograf ali se neki menjaju tokom merenja, odnosno rada klidonografa naročito pri terenskim merenjima. Stoga se tačnost merenja napona klidonografima kreće u granicama ± 15 do 20%.



sl. 304

Umesto jednog klidonografa mogu se primeniti dva u takozvanoj dupleks sprezi prema slici 305, pri čemu jedan klidonograf snima pozitivan a drugi negativan talas pri istoj vrednosti priključenog napona. Ovo radi toga jer je pozitivna fi-

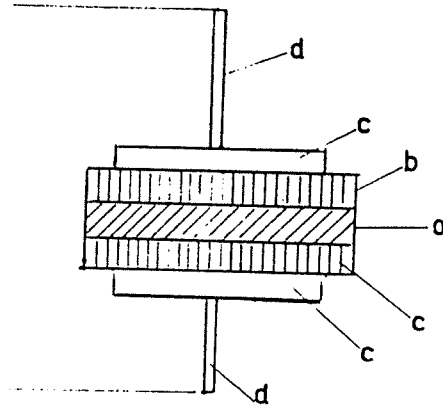


sl. 305

gura uvek veća te je kod nižih negativnih napona teže očitati tačno poluprečnik figure. Mogu se ovakva dva klidonografa spojiti u jedan na taj način da se upotrebi samo jedna metalna podloga a i jedna kasete prema slici 306.

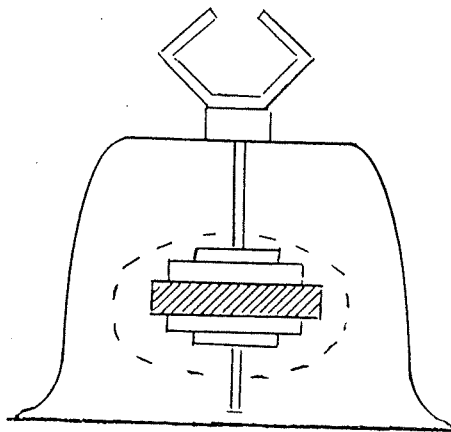
Klidonografi se obično mogu primeniti za napone najviše do 30 kV direktnim priključkom. Za više napone priključuju se

preko delila napona. Kao delila napona mogu se iskoristiti lančasti izolatori, merni kondenzatorski izvodi na provodnim izolatorima transformatora snage ili mernim transformatorima.



sl. 306

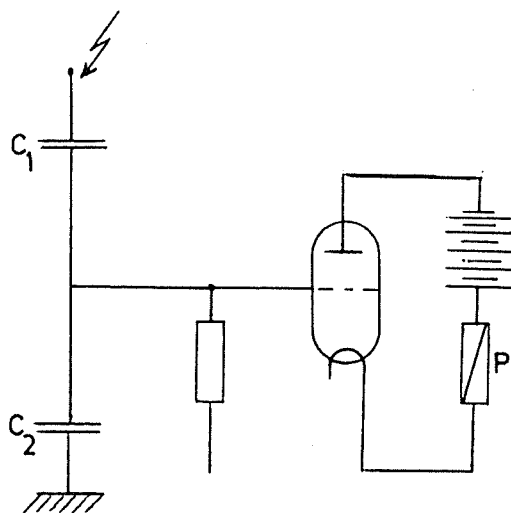
Kod masovne primene klidonografa potreba za velikim brojem delila napona kao i poteškoće koje se javljaju pri postavljanju i skidanju klidonografa u ovakvim slučajevima, jer je rad pod naponom nezgodan, zabranjen a kadkad i nemoguć, razvijena je posebna konstrukcija koja omogućava postavljanje i skidanje klidonografa pod naponom.



sl. 307

Dvostruki klidonograf prema slici 306 stavlja se sa napunjenom kasetom u specijalnu metalnu kapu zvonastog oblika, koja na svome gornjem kraju ima čeljust za pričvršćenje na provodnik pod naponom, prema slici 307. Posebno izolovanom motkom ovako pripremljena kapa se pričvršćuje za provodnik pod naponom i ostaje da visi na njemu. Jedan šiljak klidonografa je preko metalne kape i čeljusti vezan za provodnik pod naponom dok je drugi, donji, šiljak kapacitivno vezan za zemlju preko parazitnog kapaciteta koji postoji između klidonografa i zemlje. Pri baždarenju ovakvog klidonografa baždarenje treba vršiti u istim uslovima, tj. sa istim odstojanjem klidonografa od zemlje.

9. Brojila prenapona služe da u elektroenergetskim sistemima ili na objektima registruju što veći broj prenapona unutrašnjeg i spoljašnjeg porekla. U prvo vreme su to bila iskrišta sa različitim preskočnim naponima, ali se kasnije prešlo na korišćenje elektronskih elemenata. Na slici 308 data je principijelna šema jednog stepena brojila prenapona. Za delilo napona priključena je rešetka triode koja je blokirana pri normalnom naponu. Ako dodje do povišenja napona iznad unapred utvrđene vrednosti trioda je deblokirana i rele P u anodnom kolu registruje pojavu prenapona. Primenom više ovakvih trioda sa raznim stepenima mogu se izbrojati prenaponi raznih nivoa, odnosno odvojiti broj prenapona po pojedinim nivoima. Postoje konstrukcije koje koriste tranzistore i druge elektronske komponente.



sl. 308

10. Šentovi za merenje velikih udarnih struja

Merenje velikih udarnih struja može se, u većini slučajeva, svesti na merenje pada napona na poznatom otporu. Ovaj pad napona se kod merenja udarnih struja meri na oscilogramu dobivenom pomoću oscilografa za snimanje brzih pojava. Naime, udarna struja se propušta kroz poznati omski otpor pa se pad napona na tome otporu dovodi na oscilograf. Iz pada napona dobivenog na oscilogramu može se videti oblik strujnog talasa, tj. vreme trajanja čela i začelja, i izračunati amplituda udarne struje deljenjem pada napona sa vrednošću omskog otpora. Da bi se moglo ovako postupiti potrebno je da omski otpor bude bez induktivnosti, da nema znatnih promena otpora usled skin efekta, da je vrednost otpora nezavisna od veličine i oblika primenjenog napona odnosno struje i da se vrednost otpora ne menja sa temperaturom. Ovo je neophodno, jer pri velikim promenama struje u kratkim vremenskim intervalima mogu nastupiti znatne greške u merenju ukoliko gornji uslovi nisu ispunjeni. Najveću grešku unosi postojanje induktiviteta i ova greška se može oceniti na sledeći način. Pad napona na šentu koji sadrži i induktivnost bio bi:

$$\Delta U = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (772)$$

Ako uzmemo da je strmina strujnog talasa približno jednaka amplitudi podeljenoj sa vremenom trajanja čela talasa tj.

$$\frac{dI}{dt} \approx \frac{I_m}{T_c} \quad (773)$$

gornja jednačina pri merenju temenih vrednosti prelazi u:

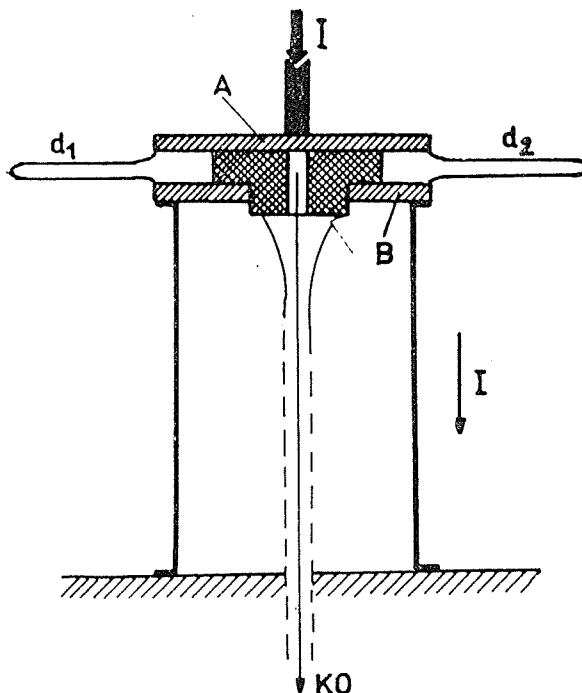
$$\Delta U = RI_m + L \frac{I_m}{T_c} \quad (774)$$

Prvi član ove jednačine predstavlja tačnu vrednost pada napona na šentu a drugi unosi grešku pri merenju. Relativna greška pri merenju bila bi:

$$\delta = \frac{L \frac{I_m}{T_c}}{R I_m} = \frac{L}{R} \frac{1}{T_c} = \frac{T_s}{T_c} \quad (775)$$

gde je $T_s = \frac{L}{R}$ vremenska konstanta šenta. Ako hoćemo da greška pri merenju amplitude ne bude veća od 5% onda vremenska konstanta šenta treba da bude $T_s \leq T_c/20$. (776)

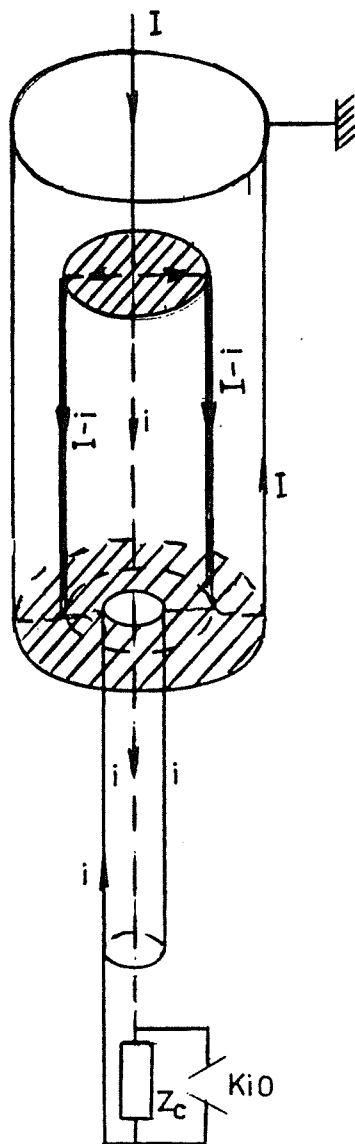
Da bi se smanjila induktivnost šenta ovakvi šentovi se grade od snopa bifilarno motanih otpornih žica prema slici 309



sl. 309

gde d_1 i d_2 predstavljaju bifilarno motane otporne žice koje su koncentrično rasporedjene u krug i svojim krajevima vezane za dovodnu A i odvodnu B ploču koje su međusobno izolovane. Priključak za oscilograf KO uzima se u sredini gde je magnetno polje praktično ravno nuli i vodi se koaksijalnim kablom do oscilografa.

Za struje većih amplituda i većih strmina primenjuju se koaksijalni šentovi. Šema jednog koaksijalnog šenta data je na slici 310. Udarana struja koja se meri I dolazi na gornju metalnu (bakar ili mesing) površinu unutrašnjeg šupljeg valjka i deli se na dva dela. Veći deo struje I -i teče preko omotača unutrašnjeg šupljeg valjka koji je izgradjen od otpornog materijala i predstavlja otpor šenta. Manji deo struje i teče preko koaksijalnog kabla i nje



sl. 310

govog završnog otpora Z_c stvarajući na istome mereni pad napona za oscilograf, pa se preko plašta koaksijalnog kabla vrđća do podnožja unutrašnjeg valjka, sumira sa strujom koja dolazi omotačem unutrašnjeg valjka i obe zajedno teku preko provodne ploče u dnu valjaka (opet od bakra ili mesinga) na omotač spoljašnjeg valjka. Spoljašnji valjak ima omotač od provodnog materijala. Ovakvom konstrukcijom i tokom struja stvara se minimalna vrednost induktiviteta šenta, a osim toga postiže se da je relativna greška još manja no kod običnih šentova, jer u račun ulazi i završni otpor kabla koji nije mali. Da bi odredili relativnu grešku kod ovakvog šenta imamo da je pad napona na otporu R unutrašnjeg cilindra koji je u stvari otpor šenta:

$$\Delta U = R(I-i) \quad (777)$$

Isti pad napona je i na završnom otporu kabla:

$$\Delta U = Z_c i \quad (778)$$

odakle sledi da je:

$$i = \frac{R}{R + Z_c} I \quad (779)$$

Kako je $Z_c \gg R$ to je $I \gg i$.

Kako struje u omotaču jednog i drugog valjka nisu potpuno jednake to se javlja i induktivnost šenta L . Relativna greška pri merenju amplituda, uz ranije uzetu vrednost za strminu, biće:

$$\delta = \frac{L \frac{di}{dt}}{RI_m} = \frac{L \frac{R}{R + Z_c} \frac{dI}{dt}}{RI_m} = \frac{L \frac{R}{R + Z_c} \frac{I_m}{T_c}}{RI_m} = \frac{L}{R + Z_c} \frac{1}{T_c} = \frac{T_s}{T_c} \quad (780)$$

Vremenska konstanta skupa $T_s = L/(R + Z_c)$ je ovde mnogo manja ne samo zbog manje vrednosti induktiviteta L već i zbog toga što se u imeniocu nalazi zbir $R + Z_c$, gde je kao što smo rekli $Z_c \gg R$.

Induktivnost koaksijalnog šenta se može izračunati prema obrascu:

$$L = \frac{d}{3r} 10^{-3} \quad \mu\text{H/cm} \quad (781)$$

gde su:

d - debljina zida unutrašnjeg, otpornog, valjka u cm

r - unutrašnji poluprečnik unutrašnjeg valjka u cm

Kadkad se umesto punog zida unutrašnjeg valjka ovaj izrađuje tako da niz paralelno vezanih otpornih žica sačinjavaju omotač valjka. Takav šent naziva se pseudokoaksijalni šent. On ima nešto manji uticaj skin efekta od običnog koaksijalnog šenta.

Kako je potrebno da se otpor šenta što manje menja sa

temperaturom potrebno je proveriti šent na zagrevanje. Toplotni proračun šenta obično se zasniva na tome da se cela energija strujnog udarnog generatora, koja se može utrošiti kadkad samo u šentu, potroši na njegovo zagrevanje i povišenje njegove temperature bez ikakvog hladjenja. Ovo je opravdano jer je vreme trajanja proticanja struje kroz šent vrlo kratko. U tom slučaju povišenje temperature šenta iznosi:

$$\Delta t = \frac{W}{M\sigma} \quad (782)$$

gde su:

Δt - zagrevanje šenta u $^{\circ}\text{C}$

W - energija u Joulima pretvorena u toplotu

M - masa otpornog materijala u kg

σ - specifična toplota otpornog materijala u $\text{J/kg } ^{\circ}\text{C}$

Ako masu šenta izrazimo kao $M = Sl\gamma$ a otpor šenta $R = \rho \frac{l}{S}$ gde su:

S - presek šenta u m^2

l - dužina šenta u m

γ - zapreminska masa otpornog materijala u kg/m^3

ρ - specifična otpornost otpornog materijala u $\Omega \text{ m}$

možu zamenom u gornju jednačinu (782) dobiti potrebna dužina ili potreban presek šenta o obliku:

$$l^2 = \frac{RW}{\Delta t \rho \gamma \sigma} \quad (783)$$

$$S^2 = \frac{W \rho}{\Delta t R \gamma \sigma} \quad (784)$$

Kao i kod delila napona i kod šentova se definiše odziv i vreme odziva samo se umesto jediničnog pravougaonog napona uzima jedinična pravougaona struja na ulazu u šent.

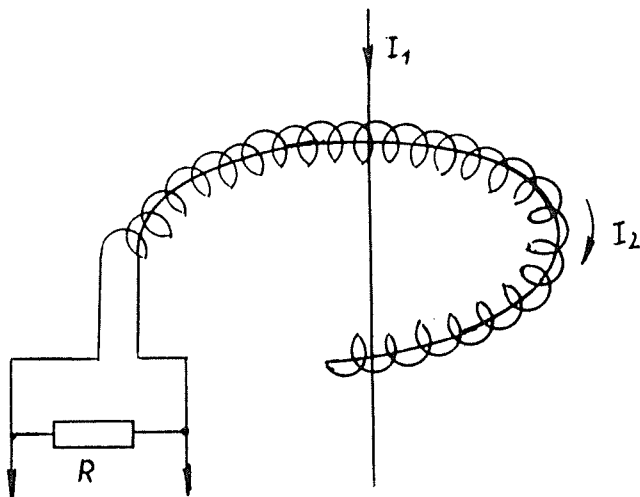
Kod koaksijalnog šenta vreme odziva se može približno izračunati iz obrasca:

$$T \approx 0,2 \frac{d^2}{\rho} \mu\text{s} \quad (785)$$

gde su:

d - debljina zida unutrašnjeg otpornog valjka u m
 ρ - specifična otpornost provodnog materijala šenta
 data u $\Omega \text{ m}$

11. Pojas Rogovskog služi takodje za merenje velikih udarnih struja. Pojas Rogovskog predstavlja prema slici 311 namotaj u vidu torusa koji obuhvata provodnik u kome treba izmeriti udar-



sl. 311

nu struju. Izlazni krajevi torusnog namotaja zatvoreni su preko otpora R sa koga se pad napona dovodi na oscilograf. Za kolo torusa može se napisati sledeća jednačina:

$$M \frac{di_1}{dt} - R_{ek} i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} = 0 \quad (786)$$

gde su:

M - uzajamna induktivnost provodnika i torusa
 L_2 - sopstvena induktivnost torusa
 R_{ek} - ekvivalentni omski otpor sekundarnog kola
 r_2 - omski otpor namotaja torusa
 $R_{ek} = r_2 + R$

Da bi merenje bilo tačno potrebno je da bude ispunjen uslov:

$$L_2 \frac{di_2}{dt} \gg R_{ek} i_2 \quad (787)$$

te gornja jednačina postaje:

$$M \frac{di_1}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \quad \text{te je} \quad i_2 = \frac{M}{L_2} i_1 \quad (788)$$

Pad napona na otporu R koji se dovodi oscilografu je:

$$U_2 = i_2 R = \frac{M}{L_2} R i_1 \quad (789)$$

Ako se za izračunavanje induktivnosti pojasa Rogovskog prime-
ne sledeće jednačine:

$$L_2 = \mu_0 N^2 (b - \sqrt{b^2 - a^2}) \quad (790)$$

$$M = \mu_0 N (b - \sqrt{b^2 - a^2}) \quad (791)$$

gde su:

a - prečnik namotaja na torusu u m

b - prečnik samoga torusa u m

N - broj zavojaka torusa

jednačina za pad napona na otporu R glasi:

$$U_2 = \frac{i_1}{N} R \quad (792)$$

Vodeći računa da se i ovde može napisati sledeći us-
lov:

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{I_{2m}}{T_{\check{c}}}$$

jednačina (787) može se za temene vrednosti napisati u sledećem
obliku:

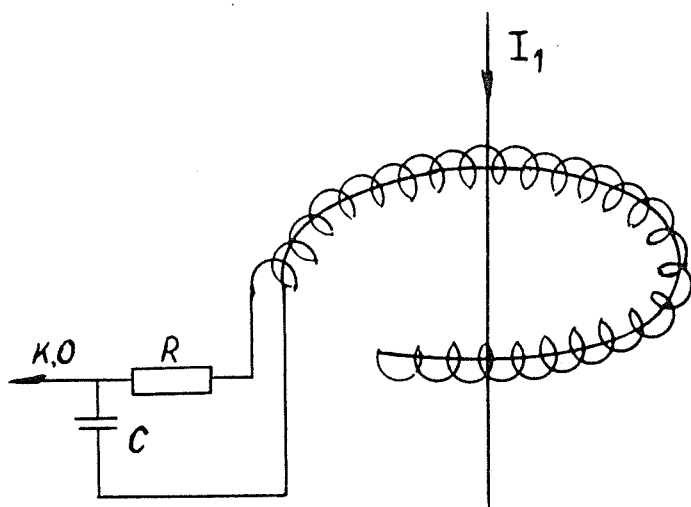
$$L_2 \frac{I_{2m}}{T_{\check{c}}} \gg R_{ek} I_{2m} \quad (793)$$

ili:

$$\frac{L_2}{R_{ek}} \gg T_{\check{c}} \text{ pa je } T_p \gg T_{\check{c}} \quad (794)$$

gde je sa T_p obeležena vremenska konstanta pojasa Rogovskog, a gornji uslov nije teško ostvariti.

Pojas Rogovskog može prema slici 312 biti na spoljašnje kolo, odnosno oscilograf, priključen preko redno vezanih otpora i kondenzatora, s tim što se pad napona na kapacitetu vodi



sl. 312

na oscilograf. Jednačina kola u ovom slučaju glasi:

$$M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} - R_{ek} i_2 - \frac{1}{C} \int i_2 dt = 0 \quad (795)$$

Ovde su potrebna dva uslova i to:

$$R_{ek} i_2 \gg L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (796)$$

$$R_{ek} i_2 \gg \frac{1}{C} \int i_2 dt \quad (797)$$

te jednačina (795) prelazi u:

$$M \frac{di_1}{dt} = R_{ek} i_2 \quad \text{tj.} \quad i_2 = \frac{M}{R_{ek}} \frac{di_1}{dt}$$

Pad napona na kapacitetu odnosno napon na oscilografu je:

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{M}{C R_{ek}} \int \frac{di_1}{dt} dt = \frac{M}{C R_{ek}} i_1 \quad (798)$$

tj. srazmeran struji u provodniku.

Prvi uslov dat jednačinom (796) može se napisati:

$$R_{ek} i_2 \gg L_2 \frac{I_{m2}}{T_{\check{c}}} \quad \text{odnosno za amplitudu} \quad R_{ek} I_{2m} \gg L_2 \frac{I_{m2}}{T_{\check{c}}}$$

odnosno:

$$T_{\check{c}} \gg \frac{L_2}{R_{ek}} \quad T_{\check{c}} \gg T_p \quad (799)$$

Drugi uslov dat jednačinom (797) posle diferenciranja daje:

$$R_{ek} \frac{di_2}{dt} \gg \frac{i_2}{C} \quad R_{ek} \frac{I_{m2}}{T_{\check{c}}} \gg \frac{I_{m2}}{C}$$

odnosno:

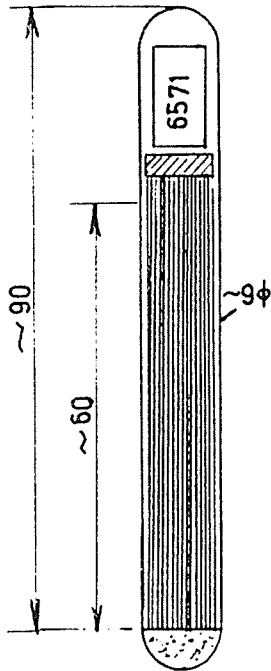
$$R_{ek} C \gg T_{\check{c}}$$

Ako se oba uslova napišu zajedno biće:

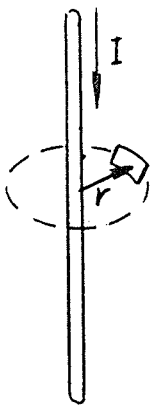
$$R_{ek} C \gg T_{\check{c}} \gg T_p \quad (800)$$

što u određenim slučajevima nije teško ostvariti.

12. Feromagnetni registratori struja (često nazvani magnetnim štapićima) služe za merenje udarnih struja i to pretežno struja atmosferskih pražnjenja. Njima se mogu meriti amplitude i polaritet udarnih struja. Feromagnetni registratori se sastoje od tankih metalnih žica, prečnika 0,2 mm načinjenih od hromkobaltnog ili hromugljeničnog čelika, koje se sastavljaju u većem broju u obliku svežnja (štapića) debljine 5 do 10 mm, stavljaju u staklenu cevčicu i zalivaju parafinom (vidi sliku 313). Osobina materijala od koga su načinjeni feromagnetni registratori je da su u magnetnom polju magneti veoma brzo, bez inercije, pod uticajem brzih promena struje. Zaostali magnetizam u štapiću posle nestanka struje, koja je stvorila polje u kome se ovaj element nalazio, služi kao merilo za određivanje struje koja ga je izazvala. Ako na primer, želimo da izmerimo struju koja protiče kroz jedan pravolinijski provodnik, stavimo ovakav štapić u pravac magnetnih linija sila koje stvara ova struja, prema slici 314. Na osnovu Bio-Savarovog zakona srednja jačina magnetnog polja na mestu gde je postavljen štapić može se izračunati po obrascu:



sl. 313



sl. 314

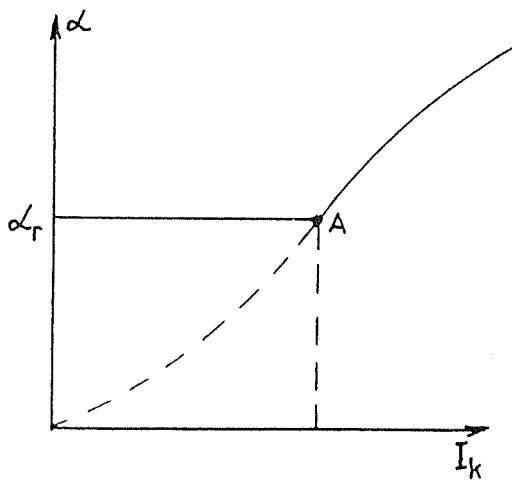
$$H = K \frac{I}{2\pi r} \quad (801)$$
 gdje su:

r - rastojanje magnetnog štapića od provodnika

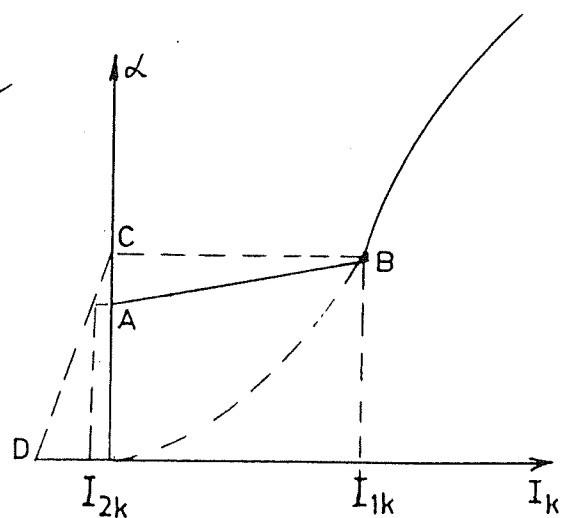
K - faktor koji vodi računa da pravolinijski provodnik nije beskonačne dužine i određuje se eksperimentalno.

Po prestanku proticanja struje magnetsko polje iščezava ali magnetni štapić zadržava izvestan remenentni magnetizam. Veličinu remanentnog magnetizma možemo registrovati provlačenjem štapića kroz kalem na koji je priključen balistički galvanometar. Skretanje balističkog galvanometra je mera remanentnog magnetizma štapića.

Da bi odredili polje koje je namagnetilo štapić, stavimo da u jedan kalem kroz koji propuštamo jednosmernu struju i magnetimo štapić. Tako se može postići da pri određenoj jednosmernoj struji polje u kalemu bude isto toliko koliko je bilo polje u blizini provodnika kroz koji je proticala udarna struja. Postupak magnećenja štapića je sledeći: štapić se magneti obavezno u istom smeru u kom je bio namagnećen udarnom strujom. Magnećenje u kalemu se vrši jednosmernom strujom koju povećavamo u malim ali jednakim skokovima. Posle svakog povećanja struje izmeri se veličina skretanja balističkog galvanometra α tj. proverava se remenentni magnetizam. Dok je magnetsko polje u kalemu manje od onoga koje je namagnetilo štapić pri proticanju udarne struje, remanentni magnetizam ostaje nepromenjen tj. skretanje na galvanometru je uvek isto i ravno onom početnom, α_1 u slučaju da je štapić bio namagnećen samo jednim strujnim udarom. U tom slučaju ako nacrtamo krivu $\alpha = f(I_k)$ dobićemo punu



sl. 315

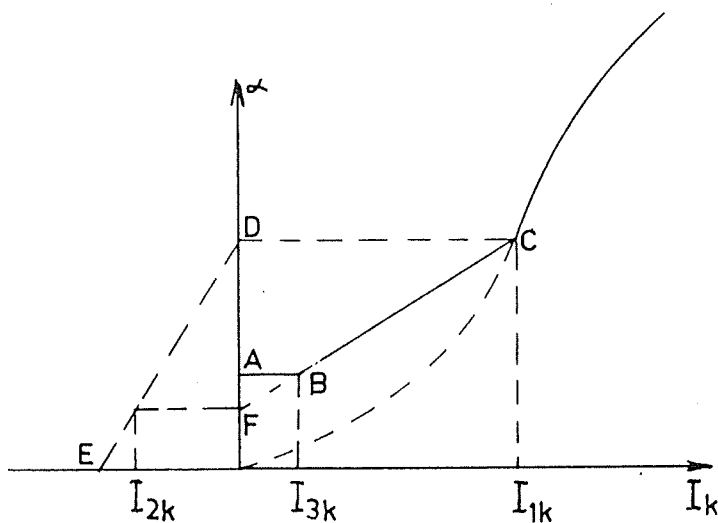


sl. 316

liniju na slici 315. Tačka A na slici 315, gde se horizontalna prava seče sa početnom krivom magnećenja nacrtanom isprekidanom linijom, odnosno gde puna linija iz horizontalnog prelazi u kosi pravac, određuje veličinu struje I_k u kalemu koja daje isto polje kao i udarna struja.

Ako su na magnetni štapić delovale dve struje suprotnih polariteta tako da je prva veća od druge dobiće se postepenim magnećenjem štapića kriva kao na slici 316, nacrtana punom linijom. Tačka B gde kosa prava prelazi u krivu početnog magnećenja određuje veličinu prve veće struje kalema I_{1k} . Sada se štapić magneti strujom u kalemu suprotnog polariteta i dobija dužina CD na slici 316. Horizontala iz tačke A u preseku sa duži CD određuje struju u kalemu I_{2k} suprotnog polariteta, koja je manja od prve struje I_{1k} .

Ako je udarna struja bila oscilatorna tj. ako su uzastopno delovale tri struje različitih, smanjujućih, amplituda i raznih polariteta postepenim magnećenjem štapića dobiće se izlomljena kriva ABC na slici 317. Tačka C gde se ova kriva spa-



sl. 317

ja sa početnom krivom magnećenja određuje prvu najveću struju I_{1k} . Prelomna tačka krive B određuje drugu manju struju istoga polariteta I_{3k} , treću po redu delovanja. Suprotnim magnećenjem štapića dobija se duž DE. Produžetak prave BC do preseka sa ordinatnom osom daje tačku F. Horizontala iz F do preseka sa duži DE određuje veličinu druge struje I_{2k} suprotnog polariteta.

Sličnim konstrukcijama mogu se dobiti i sledeće amplitude oscilatorne struje, mada je ovo već najčešće dovoljno.

Napomenimo da ako su uzastopno delovale nekoliko struja istih polariteta ali različitih amplituda remanentni magnetizam ostaje samo od najveće.

Kada su na jedan od gornjih načina određene struje u kalemu koje stvaraju isto polje, može se polje u kalemu izračunati po obrascu:

$$H = \frac{n I_k}{l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2}} \quad (802)$$

gde su:

n - broj navojaka u kalemu

I_k - jednosmerna struja u kalemu očitana sa dijagrama na slici 315 do 317

l - dužina kalema u cm

d - prečnik kalema u cm

Ako izjednačimo magnetsko polje u oba slučaja, tj. pri magnetisanju usled udarne struje i u kalemu, za udarnu struju se dobija obrazac iz koga se ona može izračunati, budući da su sve ostale veličine za datu opremu konstantne:

$$I = \frac{2r \mathcal{H} n}{k l \sqrt{1 + \left(\frac{d}{l}\right)^2}} I_k = A I_k \quad (803)$$

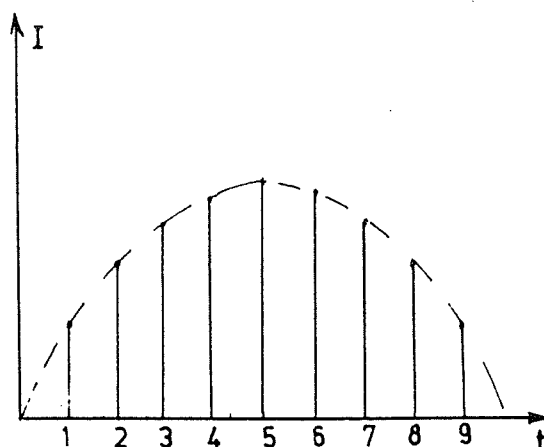
U praksi se najčešće postavljaju po dva štapića na jednom mernom mestu. Položaj oba štapića treba da je prema slici 314 s tim što je jedan i to tanji na manjem rastojanju a drugi, deblji, na većem rastojanju od provodnika. Tanji i bliži služi za merenje manjih struja a deblji za merenje većih struja od kojih se tanji može suviše namagnetiti i preći u zasićenje.

Smer udarne struje odnosno njen polaritet može se odrediti na osnovu položaja magnetnih polova štapića koristeći pravilo desne zavojnice. Krajevi štapića su različiti jer svaki štapić na jednom kraju, vidi sliku 313, ima pločicu sa svojim brojem.

Tačnost merenja udarnih struja pomoću magnetnih štapića nije velika i kreće se od $\pm 5\%$ do $\pm 20\%$ što se u slučaju merenja velikih struja i pri primeni većeg broja rezultata može tolerisati.

Magnetni štapići se primenjuju za dobijanje podataka o strujama atmosferskog pražnjenja i u tu svrhu oni se postavljaju u pojedinim karakterističnim tačkama postrojenja i dalekovoda kao što su: fazni provodnici, zaštitna ušad, provodnici za uzemljenje, kraci stubova itd.

13. Fulhronografi služe takodje za merenje udarnih struja. Kako magnetni štapići mere samo amplitude udarnih struja, mada se pomoću njih može odrediti i polaritet struje, to su razvijeni fulhronografi pomoću kojih se može dobiti i oblik udarne struje. Reč fulhronograf je kovanica od tri grčke reči: fulmen-grom, Chronos-vreme i graphein-pisati, dakle ubeležava vremenski oblik struje groma. Fulhronograf počiva na istom principu kao i magnetni štapići. Naime, po obodu jednog aluminijskog točka nalaze se čelične lamele načinjene od istoga materijala kao i magnetni štapići. Prilikom okretanja aluminijskog doboša ove lamele prolaze između zavojaka kroz koje protiče struja koju treba izmeriti. Svaka lamela je različito namagnećena u zavisnosti od trenutne vrednosti struje koja se ima u zavojcima kada je dotična lamela između zavojaka. Iz vrednosti remanentnog magnetizma pojedinih lamela i vremenskog razmaka između njihovog prolaska između zavojaka, može se nacrtati struja u zavojcima u funkciji vremena, kako je to prikazano na slici 318. Brojevi 1, 2, 3, 4, 5... itd. predstavljaju pojedine lamele naznačene redosledom kako su bile postavljene na obimu doboša. Razmak između pojedinih lamela po apscisnoj osi je vremenski interval između prolaska dvaju susednih lamela između zavojaka. Dužina ovoga intervala može se menjati promenom brzine obrtanja doboša. Dužine po ordi-

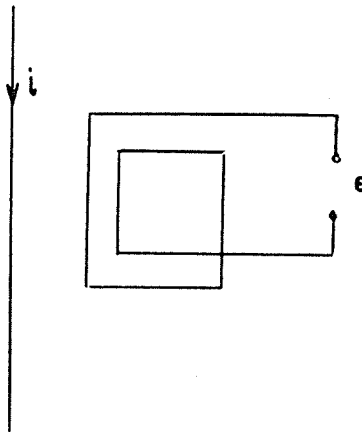


sl. 318

natnoj osi predstavljaju vrednosti struja u pojedinim lamelama, tako da isprekidana linija predstavlja oblik udarne struje u funkciji vremena.

Sa fulhronograma na slici 318 se može odrediti i strmina struje ako vreme trajanja čela strujnog talasa nije suviše kratko.

Za odredjivanje maksimalne strmine strujnog talasa može se koristiti uređaj čija je principijelna šema data na sli-



sl. 319

ci 319. Pored provodnika kroz koji protiče udarna struja i postavljen je ram sa izvesnim brojem zavojaka n . Indukovana elektromotorna sila na krajevima ovoga rama iznosi:

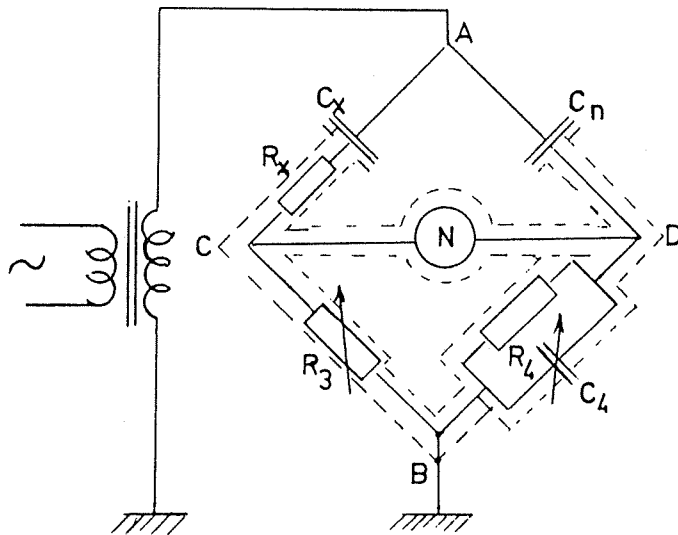
$$e = -n M \frac{di}{dt} \quad (804)$$

gde je M međusobna induktivnost rama i provodnika sa strujom i .

Ako se na krajeve rama priključi klidonograf on će ubeležiti maksimalnu vrednost indukovane elektromotorne sile koja je srazmerna maksimalnoj strmini struje u provodniku.

Ako se krajevi rama spoje i izmeri, pomoću magnetnih štapića, maksimalna struja u ramu ona će biti srazmerna maksimalnoj strmini struje u provodniku. Ako se ram spoji preko nekog kalema koji ima induktivnost i magnetni štapić postavi u taj kalem da bi se merila maksimalna struja, ova maksimalna struja u ramu biće u odredjenom opsegu srazmerna prosečnoj strmini struje u provodniku.

14. Šeringov most se koristi za merenje kapaciteta i ugla gubitaka pri visokim naponima. Ova merenja imaju veoma veliki praktični značaj jer omogućavaju uvid u kvalitet izolacije. Ugao gubitaka ($\text{tg} \delta$) zavisi od veličine primenjenog napona odnosno polja te se najčešće traži njegova promena sa naponom. Na slici 320 data je principijelna šema veza Šeringovog mosta gde su:



sl. 320

C_x - kapacitet ispitivanog objekta tj. dielektrika koji se ispituje

R_x - ekvivalentni otpor dielektričnih gubitaka postavljen redno sa kapacitetom C_x objekta koji se ispituje

C_N - etalon kapaciteta tj. kondenzator etalon bez gubitaka ili su ovi zanemarljivo mali

R_3 - omski otpor bez induktiviteta koji se može regulisati. Obično kakva dekadna kutija.

R_4 - omski otpor bez induktiviteta

C_4 - kapacitet koji se može regulisati. Obično kakva dekada kapaciteta

N - nulti indikator. Najčešće vibracioni galvanometar ili osciloskop, koji služe kao nulti indikatori za male naizmenične struje,

Pri merenju visokim naponom jedan kraj visokonaponskog izvora priključuje se za tačku A na slici 320 gde se spajaju dve grane mosta koje u sebi sadrže kapacitete C_x i C_N , a druga strana izvora je uzemljena, kao i naspramna tačka B Šeringovog mosta. Otpori R_3 i R_4 su tako izabrani da veliki deo pada napona

otpada na kapacitete C_x i C_N a na otporima R_3 i R_4 kao i kapacitetu C_4 je minimalan. To omogućava bezopasno rukovanje mostom pri podešavanju vrednosti otpora R_3 i kapaciteta C_4 .

U drugoj dijagonali mosta CD priključen je nulti indikator. Podešavanje mosta vrši se promenom otpora R_3 i kapaciteta C_4 dok se most ne uravnoteži, tj. dok dok kroz dijagonalu CD ne protiče nikakva struja. U tom slučaju važi poznati odnos:

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_4 = \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 \quad (805)$$

pri čemu impedanse pojedinih grana mosta iznose:

$$\underline{Z}_1 = R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \quad \underline{Z}_2 = \frac{1}{j\omega C_N} \quad (806)$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 \quad \underline{Z}_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4}$$

Zamenom ovih vrednosti impedansi u gornju jednačinu ravnoteže mosta dobija se:

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4} = \frac{1}{j\omega C_N} R_3 \quad (805')$$

odakle se po razdvajanju realnih i imaginarnih delova dobija:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3} \quad R_x = \frac{C_4}{C_N} R_3 \quad (807)$$

Za tangens ugla gubitaka se dobija:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_x C_x = \omega \frac{C_4}{C_N} R_3 C_N \frac{R_4}{R_3} = \omega R_4 C_4 \quad (808)$$

Iz gornjih obrazaca se vidi da se kapacitet ispitivanog objekta i njegov tangens ugla gubitaka mogu dobiti iz promenljivih elemenata mosta po njegovom urevnoteženju.

Kod praktičnih izvodenja ovakvih mostova u granu EC se pored dekadne kutije na red vezuje i otporna klizna žica radi povećanja osetljivosti. Paralelno sa ovom granom može se pak priključiti i kakav otočni otpor čija je uloga da smanji struju kroz dekadnu kutiju u slučaju kada ispitivani objekat povlači veću struju od one koja se sme propustiti kroz dekadnu kutiju.

Promenom etalona kapaciteta C_N može se povećati opseg merenja samoga mosta. Na mostu se najčešće predvidja i zaštita manipulanta da ne dodje pod visoki napon u slučaju proboja ili preskoka na ispitivanom objektu. U tu svrhu u granama mosta CF i BD se stavljaju iskrišta, tinjalice ili odvodnici prenapona.

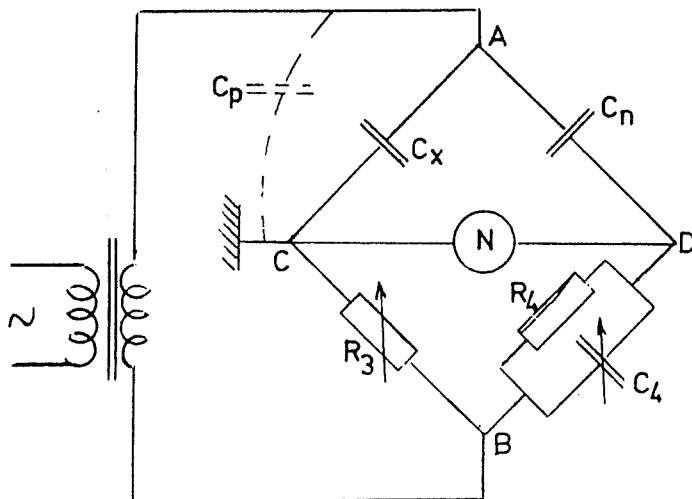
Radi sprečavanja uticaja stranih polja i otklanjanja smetnji pri merenju sve veze na mostu moraju biti oklopljenje i uzemljene. Na slici 320 ovo oklopanje naznačeno je tačkastim linijama. Ovaj oklop mora biti uzemljen, kako je to na slici 320 naznačeno, u tački B. Parazitni kapaciteti koji se javljaju na mostu su sledeći. Parazitni kapacitet tačke A prema zemlji koji predstavlja kapacitet gornjeg dela visokonaponskog transformatora i kapacitete dovoda do tačke A odnosno do C_X i C_N ne utiče na ravnotežu mosta jer je paralelan izvoru. Kapaciteti tačaka C i D prema oklopu su paralelno vezani sa otporima R_3 i R_4 te se mogu zanemariti zbog malih vrednosti ovih otpora. Ako se uticaji ovih parazitnih kapaciteta ne mogu zanemariti mora se vršiti korekcija, ili se primenjuju mostovi sa dvostrukim oklopom (vidi lit.9).

Pri merenju sa Šeringovim mostom treba voditi računa da naizmenični napon bude čisto sinusoidnog oblika jer prisustvo viših harmonika može uneti znatne greške.

Poseban problem pri merenju kapaciteta i ugla gubitaka predstavlja slučaj kada se merenja vrše na objektu čiji je jedan kraj trajno uzemljen. To je slučaj kada se vrše merenja na kablovima položenim u zemlju, mašinama i transformatorima u pogonu čiji su temelji uzemljeni. Tada se primenjuje obrnuta šema kod koje je tačka A mosta uzemljena a za tačku B mosta se priključuje na izvor visokog napona. U ovome slučaju manipulant mora biti izolovan od samoga mosta tj. podešavanje mosta se mora vršiti pomoću izolacionih poluga, ili se manipulant zajedno sa

mostom nalazi na visokom potencijalu i izolovan je od zemlje. U ovom drugom slučaju se ceo most zajedno sa manipulantom nalazi u specijalnoj kabini koja je izolovana od zemlje i priključena na visoki napon.

Da bi se izbegla opasnost manipulacije pod visokim naponom po prethodnoj obrnutoj šemi primenjuje se takozvana šema sa uzemljenom dijagonalom prema slici 321. U ovome slučaju se



slika 321

uzemljuje tačka C te je manipulant pod niskim naponom. Pri primeni ove šeme izvor naizmeničnog napona mora biti dvopolno izolovan i pri merenju se javlja greška koju treba izračunati. Tada se paralelno ispitivanom kapacitetu nalazi parazitni kapacitet C_p koji potiče od kapaciteta visokonaponskog dovoda i kapaciteta prema zemlji jednog dela namotaja transformatora. Taj kapacitet može biti dosta veliki kao i gubici u njemu te se ne može zanemariti. Da bi se izvršila korekcija njegovog uticaja najpre se mostom izmeri taj kapacitet i njegovi gubici, pri čemu je ispitivani kapacitet isključen. Zatim se merenje ponovi uz priključeni ispitivani kapacitet. Iz ova dva merenja se može izračunati kapacitet i tangens ugla gubitaka ispitivanog kondenzatora prema obrascima:

$$C_x = C_u - C_p \quad (809)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C_u \operatorname{tg} \delta_u - C_p \operatorname{tg} \delta_p}{C_u - C_p} \quad (810)$$

gde su:

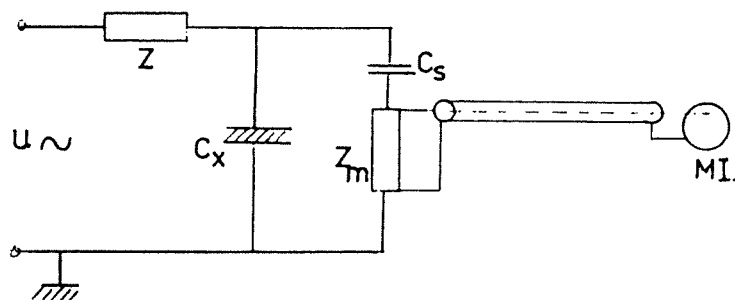
C_u - ukupni kapacitet, dobiven pri merenju kada je bio priključen i ispitivani objekat

C_p - parazitni kapacitet dobiven pri merenju bez ispitivanog objekta

$\text{tg } \delta_u$ - tangens ugla gubitaka dobiven pri merenju sa ispitivanim objektom

$\text{tg } \delta_p$ - tangens ugla gubitaka dobiven pri merenju bez ispitivanog objekta

15. Merenje parcijalnih pražnjenja, sastoji se uglavnom u određivanju napona pri kome nastaju i pri kome prestaju parcijalna pražnjenja. Pri tome se mogu meriti ili samo posmatrati sledeće veličine: količina Q_x nazvana pokazateljem parcijalnih pražnjenja ili pokazateljem intenzivnosti jonizacije, a kadkad je nazivaju i prividnim opterećenjem, n broj ponavljanja parcijalnih pražnjenja, srednja struja $i = Q_{sr} n$, kvadratna veličina $n(Q_x)^2$ ili snaga pri parcijalnim pražnjenjima, u zavisnosti od primenjenih mernih instrumenata.



slika 322

Na slikama 322 i 323 date su dve principijelne šeme za merenje parcijalnih pražnjenja gde su:

U - izvor naizmeničnog napona

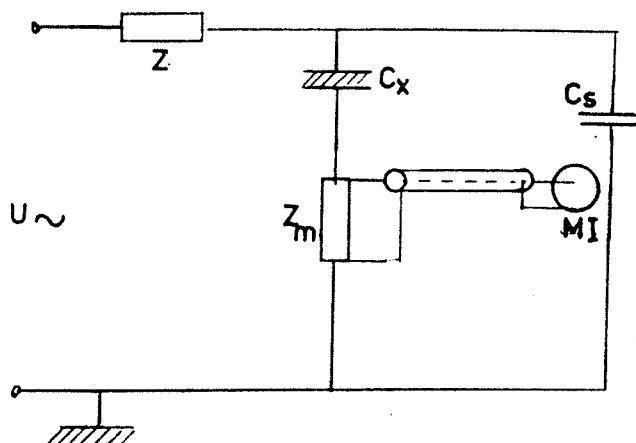
Z - impedansa ili filter koji služi da smanji smetnje koje dolaze od izvora napona

C_x - kapacitet ispitivanog objekta

C_s - kapacitet za sprezanje

Z_m - merna impedansa

MI - merni instrument vezan za mernu impedansu preko koaksijalnog kabla.



slika 323

Prema šemi na slici 322 merni instrument odnosno merna impedansa se vezuju redno sa kondenzatorom za sprezanje, dok je ispitivani objekat vezan direktno izmedju izvora napona i zemlje. Impedansa Z služi ne samo da spreči smetnje od strane izvora već i da onemogući da impulsi parcijalnih pražnjenja prodju kroz impedansu izvora te se zatvaraju preko kapaciteta za sprezanje i merne impedanse.

Šema na slici 323 ima izvesnu prednost prema prethodnoj obzirom na sprečavanje smetnji pri merenju, ali kod nje ispitivani objekat mora biti izolovan od zemlje jer je na red sa njime vezana merna impedansa.

Bez obzira na vrstu primenjenog instrumenta preporučuje se da je sa njime paralelno vezan osciloskop, jer on olakšava razlikovanje raznih vrsta parcijalnih pražnjenja kao i razlikovanje smetnji koje dolaze od spoljašnjih uticaja.

Za merenje veličine ΔQ_x može se primeniti uređaj za merenje temenih vrednosti koji je baždaren u pikokulonima.

Broj impulsa parcijalnih pražnjenja n može se meriti kakvim osetljivim brojačem impulsa, a struja parcijalnih pražnjenja instrumentom koji meri srednju vrednost impulsne struje.

Kako su merene veličine veoma male to na merenja mogu imati veliki uticaj smetnje koje mogu dolaziti od izvora napona ili od kakvih drugih uređaja u blizini (mašine sa kolektorom, prekidanje strujnih kola, visokonaponska ispitivanja, radio smetnje, itd.) Pre svakog ispitivanja treba proveriti nivo

smetnji registrovanjem istih bez priključenog napona ako se radi o smetnjama izvan ispitnog kola. Smetnje koje potiču od samog ispitnog kola treba proveriti priključkom umesto ispitivanog objekta kakav drugi objekat kod koga sigurno znamo da nema parcijalnih pražnjenja.

Tipične vrednosti minimalnih veličina koje se u praksi mogu izmeriti postojećim instrumentima kreću se, u zavisnosti od kapaciteta ispitivanog objekta, u granicama:

opterećenje ΔQ_x od $0,01 \cdot 10^{-12}$ do $5 \cdot 10^{-12}$ kulona

srednja struja i od $0,01 \cdot 10^{-9}$ do $20 \cdot 10^{-9}$ ampera

Kod merenja snage parcijalnih pražnjenja najčešće se koriste razne metode mostova, kao što su metoda petlje ili metoda modifikovanog Šeringovog mosta.

16. Zaštitni uređjaji i uputstva za rad u laboratorijama za visoki napon

Zaštitni uređjaji u laboratoriji za visoki napon su veoma važni da bi se sprečili ma kakvi nesrećni slučajevi pri radu. Nabrojaćemo najvažnije zaštitne uređjaje i načine njihove primene pri radu.

Svaka laboratorija za visoki napon mora imati svoje posebno uzemljenje nezavisno od uzemljenja napojne mreže, transformatorske stanice i ostalog dela zgrade ukoliko je sama laboratorija u okviru većeg kompleksa zgrada. Ovo uzemljenje mora biti solidno izvedeno tako da mu otpor uzemljenja bude što manji. Najbolje je koristiti sonde pobivene u podu same laboratorije. Iznad ovih sondi u podu laboratorije treba postaviti metalnu mrežu koja treba da se nastavi i po ostalim zidovima i tavanici laboratorije tako da obrazuje Faradejev kavez. Za ovo uzemljenje mora da budu stalno priključeni svi metalni delovi koji se nalaze u laboratoriji i koji pri radu normalno ne dolaze pod visoki napon, kađ na primer sud transformatora, metalne konstrukcije hale, žičana ograda itd.

Prilikom ispitivanja visokim naponima vodovi za uzemljenje izvora napona, ispitivanog objekta kao i mernih uređjaja treba da su tako postavljeni da ne obrazuju omče i po mogućstvu ih treba samo na jednom mestu vezati za uzemljenje laboratorije. Ukoliko je u podu laboratorije gusto postavljena mreže za Faradejev kavez mogu se pojedini aparati vezati i direktno za uzemljenje. U oba slučaja uzemljenja treba pre ispitivanja proveriti eventualni nivo smetnji koji može nastati usled loše vezanih ili oblikovanih veza za uzemljenje.

Osim toga u prostoru gde se vrše merenja i ispitivanja treba predvideti i potreban broj takozvanih pokretnih uzemljivača koji su vezani za uzemljenje laboratorije. Ovi pokretni uzemljivači služe da se uzemlje, po isključenju napona, svih onih delova koji su bili pod naponom a kojima treba da pridje osoblje radi kakve manipulacije. Pokretni uzemljivači se vezuju na primer za krajeve visokog napona ispitnog transformatora, udarnih generatora, izvora jednosmernog visokog napona, kondenzatora itd. pre pristupanja istim. Naročito treba biti oprezan pri radu sa kondenzatorima koji i posle isključenja napona mogu ostati opterećeni pa ih treba vezivanjem za uzemljenje rasteretiti eventualno preko prigodnog otpora ili direktno.

Aparate za visoki napon (transformatore, udarne generatore, kaskadne generatore, kondenzatore itd.), vodove visokog napona kao i ispitivane objekte treba pri radu ograditi tako da im je pristup, dok su pod naponom, onemogućen. Ovo se najbolje i najlakše može postići postavljanjem žičane ograde oko svih aparata i instrumenata koji su pod naponom. Žičana ograda može biti stalna ili pokretna. U oba slučaja ovu ogradu treba dobro vezati za uzemljenje laboratorije. Isto tako treba obezbediti da se u prostor obuhvaćen ogradom ne može ući bez prekida napajanja izvora visokog napona na niskonaponskoj strani. Ovo se postiže raznim blokiranjima, mehaničkim ili električnim putem. Pri tome ovo blokiranje treba izvesti na takav način da su nemoguće mahinalne greške. Na ogradi treba na vidljivim mestima staviti opomenske tablice sa natpisom: "Pazi, visoki napon, opasno po život". Pored ovoga mogu se predvideti razni svetlosni ili akustični signali u kombinaciji sa uključivanjem visokog napona odnosno blokiranjem.

Pri postavljanju vodova visokog napona unutar ogradjenog prostora, a u cilju ostvarivanja raznih veza, treba uvek voditi računa da se ovi vodovi postave na dovoljnom međusobnom rastojanju kao i na dovoljnom rastojanju od uzemljenih delova i ograde da ne bi došlo do neželjenih preskoka između provodnika ili prema uzemljenim delovima. Ova rastojanja su zavisna od veličine i vrste primenjenog napona.

Kao jednu od važnih mera bezbednosti i zaštite treba predvideti najmanje jedno vidljivo prekidno mesto strujnog kola i to na strani niskog ili visokog napona.

Kako se u laboratoriji za visoki napon mogu obavljati radovi sa zapaljivim materijalom to treba predvideti i uredjaje

za gašenje požara, kao što su na primer sanduk sa peskom, pokrivač od azbesta ili specijalni aparat za gašenje požara u prostorijama gde ima napona.

U laboratoriji za visoki napon treba na vidnom mestu istaći uputstvo za prvu pomoć ozledjenom usled udara struje, sa kojim treba da je upoznato osoblje koje radi u laboratoriji.

Što se tiče uputstava za rad u laboratoriji za visoki napon ne može se dati neko univerzalno uputstvo, ali će se ovde izložiti glavni principi i smernice kojih se treba pridržavati.

Svaka laboratorija za visoki napon treba da ima svoje pisane propise i uputstva za rad u kojima pre svega treba da je tačno precizirano ko, kada, kako i čime sme i treba da rukuje, odnosno ko je ovlašćen da dozvoli rad u laboratoriji i pod kakvim uslovima. Ovo je naročito važno ako u laboratoriju imaju pristup i lica koja nisu obučena za rad u laboratoriji za visoki napon, odnosno nisu stručnjaci elektrotehničke struke.

Osnovno i najvažnije uputstvo za sve one koji ulaze u prostor visokog napona, bez obzira da li su stručnjaci ili ne, a naročito ako rade u laboratoriji za visoki napon i često ulaze u ovaj prostor, je da se lično uvere da je napon isključen i da su rastavno mesto, ili mesta, rastavljeni i da lično izvrše uzemljenje delova koji su bili pod naponom pomoću pokretnih uzemljivača. Tek potom mogu ući u prostor visokog napona. Ne oslanjati se ni u kom slučaju da je to neko drugi proverio ili uradio jer baš u takvim slučajevima dolazi do nesreće.

Povremeno vršiti kontrolu signalnih, a naročito zaštitnih uredjaja pogotovu ako su oni složenije konstrukcije i zahtevaju izvesno održavanje.

Preporučuje se da, po mogućstvu, rad sa visokim naponom ne vrši jedno lice već najmanje dva, od kojih će jedno vršiti manipulacije a drugo posmatrati i kontrolisati, dejstvujući samo u slučaju greške ili direktne opasnosti. Ovo naročito važi ako se rad u laboratoriji za visoki napon mora vršiti i noću.

Sva lica koja rade sa visokim naponom odnosno koja su izložena opasnosti od strane visokog napona moraju biti osigurana kod osiguravajućih zavoda od nesrećnog slučaja.