

namotaja prvog transformatora (slika 214 i 215) odnosno najnižih izolacionih transformatora (slika 216), koji su na niskom naponu. Obično se velike kaskade napajaju iz posebnih generatora, te se regulisanje vrši preko promene pobude samog generatora.

Primena kaskada na mesto transformatora u vidu jedne jedinice ima sledeće prednosti:

- 1) primenjuju se transformatori koji kao jedinice imaju niže napone, što olakšava njihovu konstrukciju,
- 2) svaki transformator pojedinačno može se koristiti sam nezavisno od drugih,
- 3) u slučaju oštećenja jednog transformatora ostali deo kaskade može da se upotrebi za dalji rad i
- 4) sa kaskadom od tri jedinice može se dobiti trofazni visoki napon, napajanjem svake jedinice drugim faznim naponom.

### 8. 3 Uredjaji za dobijanje visokih jednosmernih napona

Jednosmerni napon za ispitivanje primenjuje se kod ispitivanja uredjaja velikih kapacitivnosti (kondenzatori, kablovi i slično) gde bi uredjaji za ispitivanje naizmeničnim naponom morali imati veliku snagu.

Visoki jednosmerni naponi mogu se dobiti:

- ispravljanjem naizmenične struje industrijske učestalosti,
- sprezanjem ispravljača u kombinacijama sa kondenzatorima i
- pomoću elektrostatičkih generatora.

#### 8. 3. 1 Ispravljači naizmenične struje u jednosmernu

Ispravljači naizmenične struje u jednosmernu mogu biti:

- cevni,
- suvi i
- mehanički ispravljači.

##### 8. 3. 1. 1 Cevni ispravljači

Cevni ispravljači imaju isti princip kao i elektronske cevi, a osobina im je da u jednoj poluperiodi propuštaju struju, a u drugoj ne. Ima ih dve vrste i to sa visokim vakuumom i punjenih gasom. Oba tipa imaju užarenu katodu koja emituje elektrone i koja može biti od različitog materijala kod raznih tipova (volfram, volfram prevučen torijumom). Anoda može biti u obliku ravne ploče ili kapice (kalote). Kod tipa sa vakuumom, obe elektrode su smeštene u stakleni balon iz koga je izvučen vazduh. Rastojanje između elektroda je vrlo malo ali ipak dovoljno da ne dodje do preskoka u slučaju kada rade u zaprečnom

smeru. U propusnom smeru ove cevi imaju izvestan otpor koji se obično izražava u obliku pada napona kroz samu cev. Ovaj pad napona je promenljiv usled sekundarnih elektrona sa anode koji se talože po staklenom zidu suda i obrazuju rešetku sa promenljivim potencijalom. Vek ovih cevi iznosi nekoliko stotina do nekoliko hiljada časova.

### 8. 3. 1. 2 Suvi ispravljači

Suvi ispravljači koji se u praksi načešće primenjuju za dobijanje visokih napona su selenski, silicijumski i germanijumski ispravljači. Kod selenskih ispravljača zaprečni napon po jednoj ćeliji je vrlo mali, 5 do 20 V, ali se oni za dobijanje vrlo visokih napona vezuju redno i paralelno. Kako elementi selenskih ispravljača mogu propuštati veoma male struje i kako na njihov rad utiče promena temperature odnosno zagrevanje, treba voditi računa da se trajno ne preopterećete jer može doći do proboja ispravljača u zaprečnom smeru. Silicijumski i germanijumski ispravljači mogu podnositi mnogo veće struje pa i napone od selenskih te nalaze sve veću primenu za dobijanje vrlo visokih napona. Oni su najčešće osetljiviji na naponska nego na strujna odnosno toplotna naprezanja, te pri rednoj vezi više elemenata treba voditi računa da raspodela napona po elementima bude ravnomerna. To se kod raznih tipova postiže šentiranjem elemenata otporima ili kondenzatorima. Kod izvesnih tipova je potrebna i primena rednih otpora radi zaštite od preopterećenja.

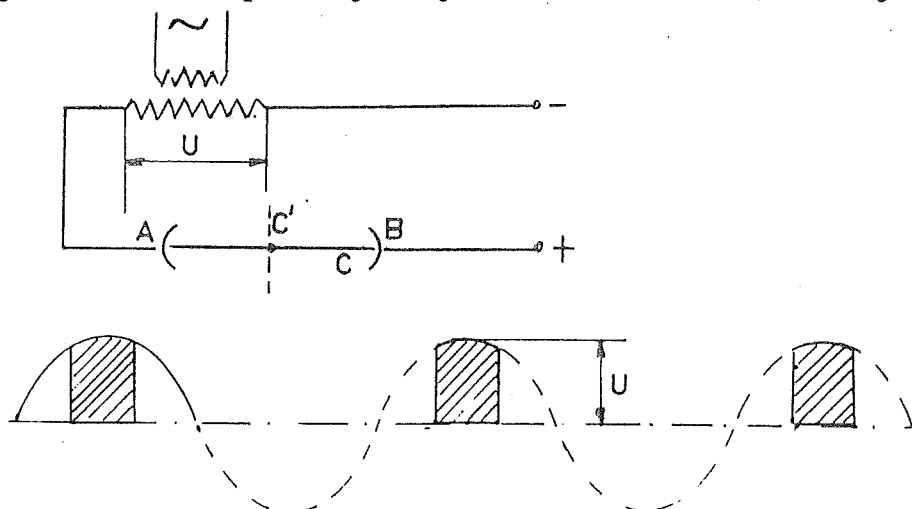
Normalno opterećeni svi suvi ispravljači rade praktično bez nadzora i vek trajanja im je gotovo neograničen, te su u poslednje vreme našli široku primenu za ispravljanje vrlo visokih napona.

### 8. 3. 1. 3 Mehanički ispravljači

Mehanički ispravljači zasnivaju se na principu da se mehanički vrši podešavanje trenutka kada će se propustiti struja u jednom odredjenom smeru, a kada ne. Sastoje se od jednog sinhronog motora koji je priključen na istu mreži čiji se napon želi ispravljati i jedne provodne poluge ili izolovane okrugle ploče sa metalnim sektorima, koje okreće ovaj sinhroni motor. Na sledećem primeru je pokazano kako se vrši mehaničko ispravljanje naizmeničnog napona.

Transformator za visoki napon vezan je prema slici 217, jednim krajem preko mehaničkog ispravljača odnosno preko dva kružna sektora A i B i poluge ispravljača C, a drugim krajem

direktno za spoljašnje kolo gde želimo koristiti jednosmerni napon. Ako se broj obrta poluge  $\check{C}$ , koju pokreće sinhroni motor, podesi tako da je ona uvek u položaju koji ima na slici 217 kada je

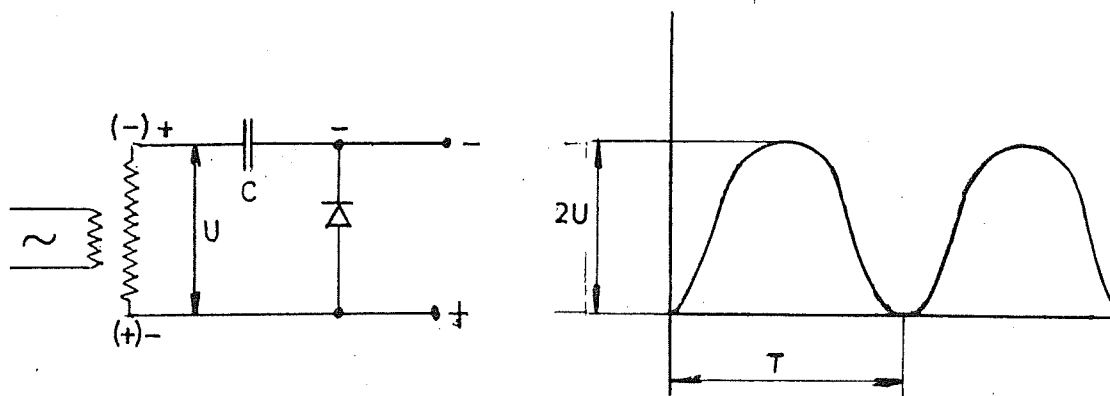


sl. 217

sektor A na pozitivnom potencijalu, a u položaju  $C'$  kada se polaritet promeni, tada će se dobiti jednosmerni napon kao na slici 217. Dobija se ispravljeni jednosmerni napon u svakoj drugoj poluperiodi u obliku impulsa koji su šrafirani na slici. Mehanički ispravljači su nezgodni jer jako varniče te unose smetnje, ispravljeni napon je u obliku impulsa te ga treba filtrirati, prisustvo ozona usled varničenja izaziva koroziju itd. te se veoma retko upotrebljavaju.

### 8. 3. 2 Sprezanje ispravljača u kombinacijama sa kondenzatorima

Najjednostavniji slučaj sprezanja ispravljača u kombina-

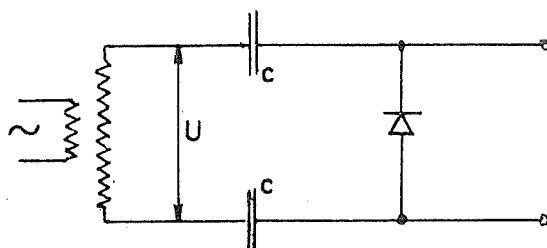


sl. 218

ciji sa kondenzatorima kada se primeni jedan kondenzator i je-

dan ispravljački elemenat prikazan na slici 218. U toku jedne poluperiode, kada je polaritet takav da ispravljački elemenat propušta, opterećuje se kondenzator C do amplitude naizmeničnog napona, a napon na priključnim krajevima jednosmernog napona je nula. U drugoj poluperiodi, kada ispravljački elemenat deluje zaprečno sabiraju se napon na kondenzatoru i transformatoru i ukupni napon je dva puta viši od amplitude naizmeničnog napona. Dobija se jednosmerni napon koji pulzira od nule do  $2U$  u toku jedne periode.

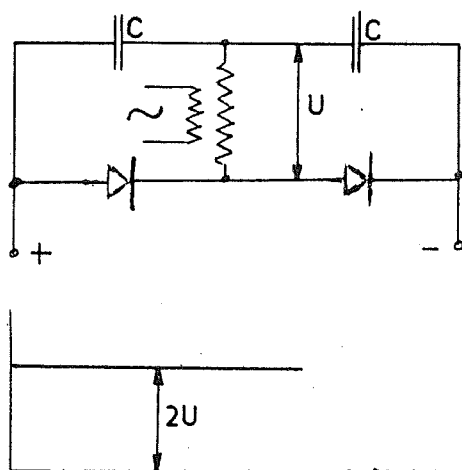
Šema prema slici 219 daje isti jednosmerni napon mada



sl. 219

su primenjena dva kondenzatora. U ovome slučaju oba kondenzatora se optereće samo sa polovinom napona ravnog amplitude naizmeničnog napona.

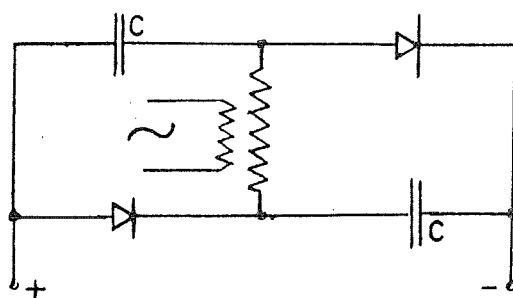
Prema sprezi na slici 220 može se sa dva kondenzatora



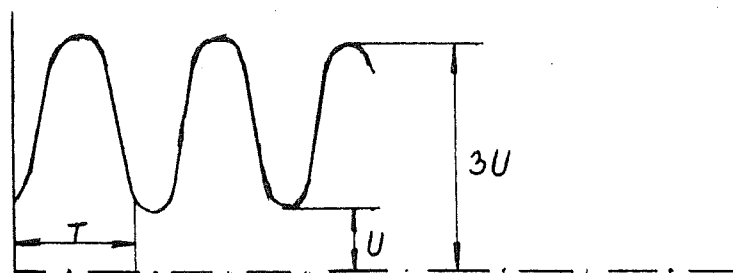
sl. 220

i dva ispravljačka elementa dobiti jednosmerni napon praktično konstantan, ako jednosmerna struja opterećenja nije velika i ako su kapaciteti dovoljno veliki. Vrednost jednosmernog napona ravna je dvostrukoj vrednosti naizmeničnog napona. Kod ove sprege u jednoj poluperiodi se opterećuje jedan kondenzator, a u drugoj drugi. Kako su oba kondenzatora u odnosu na spoljašnje kolo vezana na red, to će jednosmerni napon biti praktično konstantan.

Sledeća šema, na slici 221, daje mogućnost da se pomoću dva kondenzatora i dva ispravljačka elementa dobije jednosmerni napon koji pulzira između  $U$  i  $3U$ . U jednoj poluperiodi, kada polaritet odgovara, oba ispravljačka elementa propuštaju i oba kondenzatora se optereće do napona  $U$ , a istovremeno na izlazu jednosmernog napona postoji napon  $U$ . U drugoj poluperiodi oba ispravljačka elementa ne propuštaju. Sada su u odnosu na spoljašnje kolo, oba kondenzatora vezana na red sa namotajem transformatora, te je ukupni napon  $3U$ .



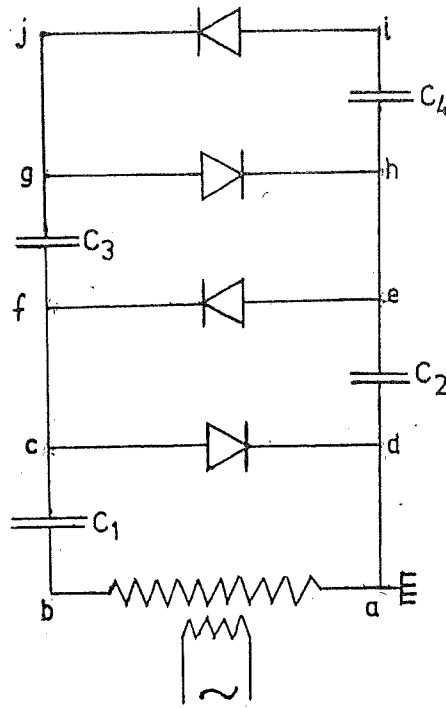
Sl. 221



Sl. 222

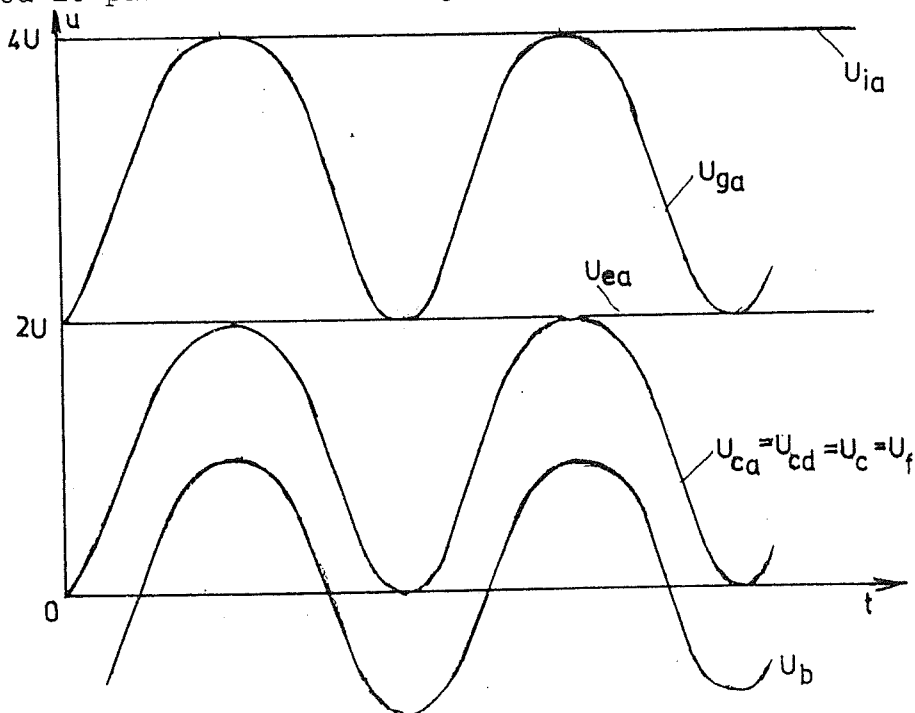
Kombinacijom šeme na slici 223 mogu se prema skici na slici 224 dobiti vrlo visoki jednosmerni naponi. Deo  $abcd$  na slici 223 je isti kao i šema data na slici 218, te između tačaka  $c - d$ , odnosno  $c - a$  jer je  $a - d$  kratkospojeno, postoji jednosmerni napon koji varira od nule do  $2U$ , tj. tačke  $c$  i  $f$  menjaju svoj potencijal od nule do  $2U$ . Deo  $cdef$  između krajeva  $c - d$  ima napon koji varira od nule do  $2U$ . Propusni smer drugog ispravljača je podešen tako da se kondenzator  $C_2$  op-

terećuje do napona  $2U$  kada je tačka  $c$  na potencijalu  $2U$ . Kondenzator zadržava ovaj napon i kada napon tačke  $c$ , odnosno  $f$  padne na nulu. Dakle, tačka  $e$  zadržava napon  $2U$  stalno u odnosu na tačku  $d$  odnosno  $a$ , dok napon tačaka  $f$  i  $c$  varira od nule do  $2U$ . Deo  $efgh$  ima na krajevima  $e - f$  napon koji varira od nule do



sl. 223

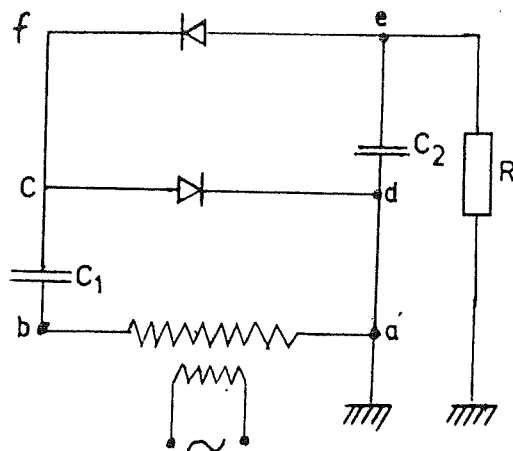
do  $2U$  s tim što tačka  $e$  ima stalno napon  $2U$ , a tačka  $f$  napon koji od  $2U$  pada na nulu. Kada je tačka  $f$  na nuli opteretiti se kon-



sl. 224

denzator  $C_3$  preko trećeg ispravljača naponom  $2U$ , a kada tačka  $f$  dobije potencijal  $2U$  tačka  $g$  se penje na  $4U$ . Znači napon tačke  $g$  u odnosu na tačku  $a$  varira od  $2U$  do  $4U$ , dok u odnosu na tačku  $h$  varira od  $2U$  do nule. Deo  $ghij$  na kome između krajeva  $h - g$  napon varira od  $2U$  do nule, omogućava da se kondenzator  $C_4$  optereti do napona  $2U$  u propusnom smeru četvrtog ispravljača i zadrži taj napon i kada potencijal tačke  $g$  padne na  $2U$ , te će između  $h - i$  biti stalno  $2U$ , a kako je tačka  $h$  već na stalnom potencijalu  $2U$  u odnosu na tačku  $a$ , to će i tačka  $i$  biti u odnosu na tačku  $a$  na stalnom potencijalu  $4U$ . Na ovaj način dobija se stalni jednosmerni napon četvorostrukog iznosa naizmeničnog napona, ako zanemarimo padove napona u ispravljačima i eventualno rasterećenje kondenzatora usled spoljašnjeg potrošača. Ovakvi uređaji za dobijanje visokih jednosmernih napona nazivaju se najčešće kaskadnim generatorima jednosmernog napona.

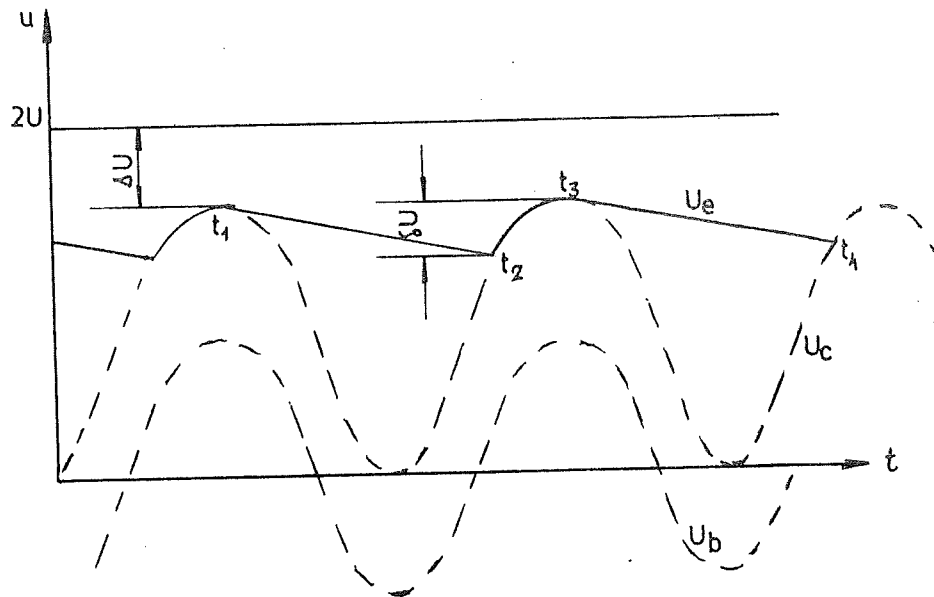
U slučaju kada je kaskadni generator jednosmernog napona opterećen kakvim spoljašnjim otporom javlja se pad napona i nastaju promene napona kao posledice ispravljanja naizmeničnog napona. Na slici 225 dat je samo prvi stepen kaskadnog ge-



sl. 225

neratora prema šemi na slici 223 gde je na spoljašnje kolo između tačaka  $a$  i  $e$  priključen omski otpor opterećenja  $R$ . Napon tačke  $e$  nije više konstantan već od trenutka  $t_1$  prema slici 226 opada do trenutka  $t_2$  usled rasterećenja kondenzatora kroz spoljašnji otpor  $R$ . To isto se dešava i u intervalu od  $t_3$  do  $t_4$ . U intervalu od  $t_2$  do  $t_3$  vrši se opterećenje kondenzatora  $C_2$ . Dakle, napon  $u_e$  nije više konstantan i niži je od napona u praznom ho-

du koji iznosi  $2U$ . Razlika između napona u praznom hodu i najvišeg napona pri opterećenju naziva se pad napona, koji za je-



sl. 226

dan stupanj kaskadnog generatora iznosi (vidi sliku 226):

$$\Delta U = I_{sr} / fC_1 \quad (595)$$

gde su:

$I_{sr}$  - srednja (aritmetička) vrednost struje koja protiče kroz otpor  $R$

$f$  - učestanost naizmeničnog napona.

Razlika između maksimalne i minimalne vrednosti napona  $u_e$  naziva se pulzacija i ona se (slika 226) izračunava iz obrasca:

$$\delta U = \frac{I_{sr}}{fC_2} \quad (596)$$

Kod višestepenih kaskadnih generatora jednosmerne struje prema slici 223 napon praznog hoda iznosi:

$$U_{pr.h} = 2nU \quad (597)$$



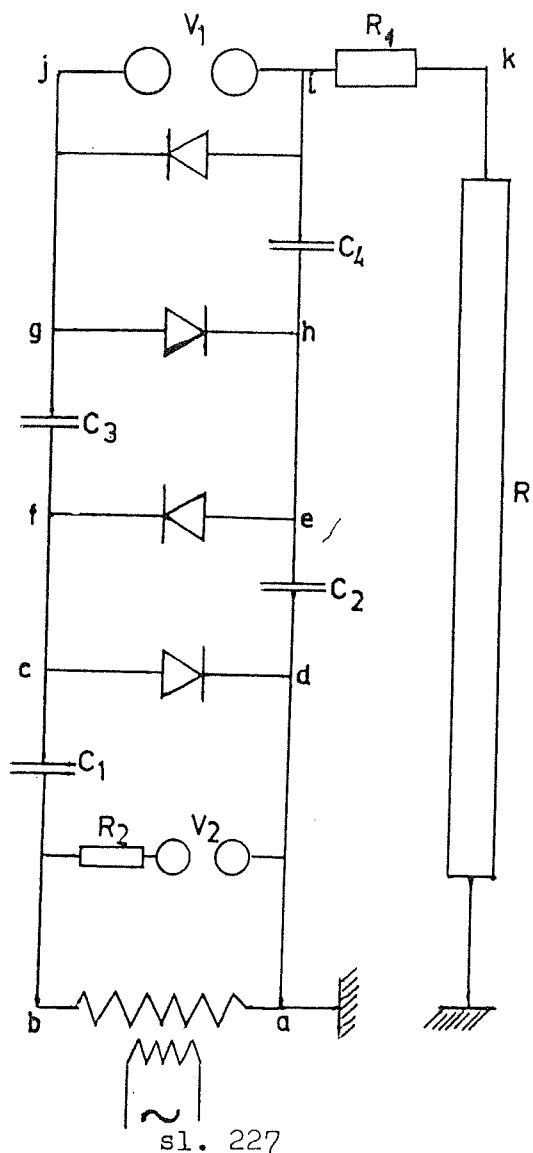
Ukupni pad napona u kaskadi od  $n$  stupnjeva dobija se iz obrasca:

$$\Delta U = \frac{I_{sr}}{fC} \left( \frac{2}{3} n^3 + \frac{1}{2} n^2 - \frac{n}{6} \right) \quad (598)$$

a ukupna pulzacija napona na izlazu kaskadnog generatora je:

$$\delta U = \frac{I_{sr}}{f \cdot C} \frac{(n + 1)n}{2} \quad (599)$$

pri čemu je uzeto da su svi kapaciteti kaskadnog generatora jednaki.



Na slici 227 data je šema kaskadnog generatora koji se najčešće upotrebljava pri ispitivanju izolacije jednosmernim naponom. U ovome slučaju otpor  $R$  predstavlja otpor izolacije koja se ispituje jednosmernim naponom. Kaskadni generator je snabdeven zaštitnim uređajima za slučaj kada dodje do proboja izolacije. Ako na primer, dodje do proboja izolacije tačka  $k$  pada približno na potencijal zemlje, te je i tačka  $i$  na bliskom potencijalu zemlji, jer je otpor  $R_1$  relativno mali. Otpor  $R_1$  je zaštitni otpor koji zajedno sa otporom na mestu proboja ograničava struju rasterećenja redno vezanih kapaciteta  $C_2$  i  $C_4$ . Kako je tačka  $i$  na potencijalu bli-

skom zemlji, a tačka j može doći na potencijal  $4U$  to postoji iskrište  $V_1$  koje reaguje radi zaštite najvišeg ispravljača od prevelikog napona. Reagovanjem ovog iskrišta tačka j dolazi na potencijal blizak zemlji, te redno vezani kondenzatori  $C_1$  i  $C_3$ , koji su opterećeni, dovode tačku b na visok potencijal što ima za posledicu reagovanje iskrišta  $V_2$ . Reagovanjem iskrišta  $V_2$  mogu se rasteretiti redno vezani kondenzatori  $C_1$  i  $C_3$  preko otpora  $R_2$ . Otpor  $R_2$  istovremeno služi da ograniči struju u sekundarnom kolu napojnog transformatora, koje je kratko spojeno preko otpora  $R_2$  pri reagovanju iskrišta  $V_2$ .

Kod svih ovih sprega sa kondenzatorima treba voditi računa da su ispravljači dosta napregnuti, usled opterećenja kondenzatora ako ova traju veoma kratko, a isto tako i da su ispravljači podvrgnuti dvostruko višem naponu od napona napajanja te ih obzirom na ova dva uslova rada treba i dimenzionisati.

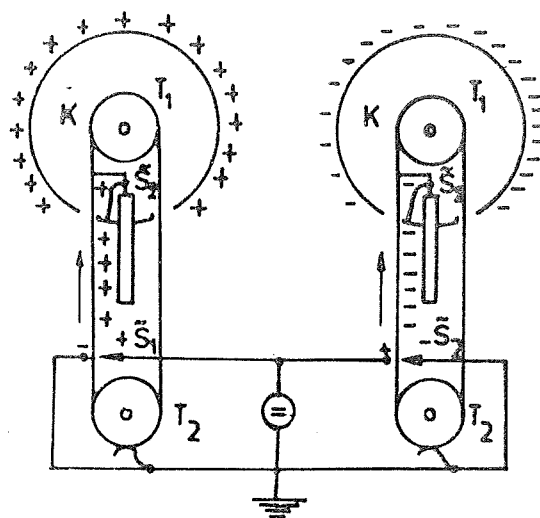
Tehničku teškoću kod kaskadnih generatora predstavlja problem grejanja pri primeni cevnih ispravljača, jer svi ispravljači moraju biti izolovani za visoke napone. Ovo se rešava pomoću zasebnih akumulatora za grejanje svake cevi ponaosob ili pomoću malih generatora sa stalnim magnetima gonjenim zajedničkim izolovanim vratilom pomoću jednog elektromotora. Zbog ovih teškoća sve je češća primena suvih ispravljača. Mogu se kadkad sresti i mehanički ispravljači čije se obrtne poluge nalaze na istom izolovanom vratilu gonjenom od jednog sinhronog motora.

### 8. 3. 3 Elektrostatički generatori

Od elektrostatičkih generatora pomenućemo samo onaj koji je od 1929. godine pa nadalje razradio Van de Graaff a čija je principijelna šema data na slici 228. Beskonačne trake od gume prebačene su preko dva točka  $T_1$  i  $T_2$  i kreću se u smeru strelica na slici. Ove trake se električno opterećuju usled dejstva šiljka  $\check{S}_1$  i to jedna pozitivno, a druga negativno, naponom do 10 kV iz jednog izvora jednosmerne struje. Ove trake odnose električne tovarne i preko šiljaka  $\check{S}_2$  opterećuju sfera K. Sa opterećenjem sfera raste njihov potencijal te se između sfera mogu dobiti vrlo visoki naponi, čak i do 10 MV. Ukoliko se želi postići što viši napon mogu se primeniti dve ili više traka paralelno, jer se time povećava brzina opterećenja sfera. Brzina kretanja trake uzima se i do 40 m/s, a opterećenje trake po  $1 \text{ cm}^2$  sa jedne strane iznosi oko  $2,6 \times 10^{-9} \text{ C}$ , tako da struje dostižu vrednosti miliampera.

Prí kretanju traka, odnosno opterećenju sfera, postoji

odvod kroz izolaciju, zračenje i drugi gubici tako da su stvarno dobiveni naponi niži od proračunatih. Kako je ovaj generator



sl. 228

jako osetljiv na odvođe naročito usled vlažnosti vazduha to se u izvesnim slučajevima u izolacioni stub u kome su trake udvaja topao vazduh da bi se smanjio odvod. Ovi generatori se ređe primenjuju za visokonaponska ispitivanja, ali se češće primenjuju u atomskoj fizici.

#### 8. 4 Uredjaji za dobijanje visokih udarnih napona

##### 8. 4. 1 Potreba za ispitivanjima visokim udarnim naponima

Najopasniji talasi udarnih prenapona stvaraju se u električnim postrojenjima za vreme raznih promena u sistemu (komutacija i sl.) i usled prenapona koji nastaju pri atmosferskim pražnjenjima. Ovi prenaponi mogu izazvati oštećenje izolacije i isključenje postrojenja iz pogona. Stoga se vrše ispitivanja izolacije, uređaja i opreme postrojenja udarnim naponima koji simuliraju atmosferske i unutrašnje prenapone. Zbog moguće pojave oštećenja izolacije za vreme ovih ispitivanja postoji podeljenost mišljenja da li treba ili ne ispitivati izvesne uređaje i opremu visokim udarnim naponima u svim slučajevima.