

1 UVOD

1.1 Zgodovinski razvoj

Mo nostna elektronika je tehni na veda, ki se ukvarja z vklapljanjem in izklapljanjem, s krmiljenjem in pretvarjanjem elektri ne energije iz ene v drugo obliko s pomo jo **tokovnih** oziroma **elektri nih ventilov**. V veliki meri vklju uje tudi pripadajo e merilne, krmilne in regulacijske naprave.

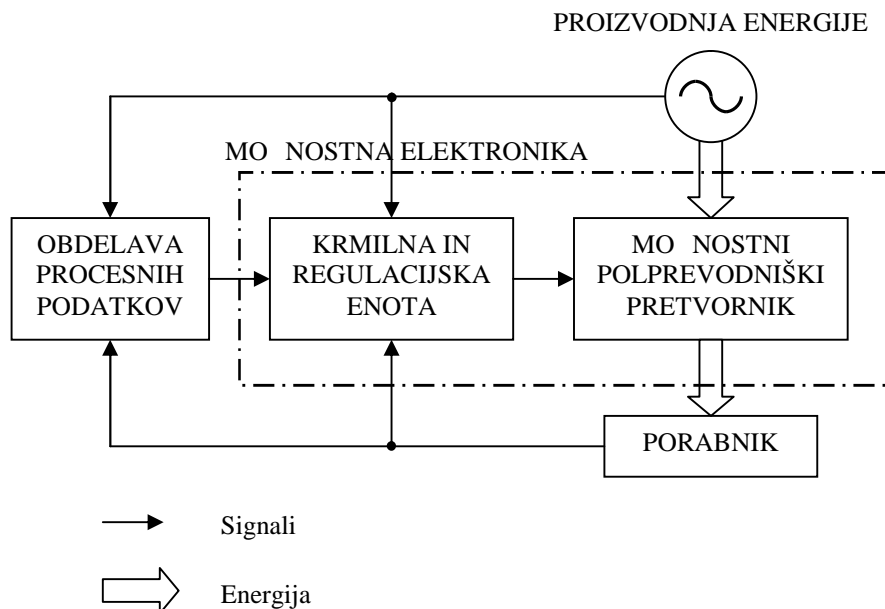
Mo nostna elektronika se je razvila iz tako imenovane »usmerniške tehnike«, ki ima dolgoletno tradicijo. Tudi predavanja o tej veji tehnike so se neko imenovala »Usmerniki«. V za etku prejšnjega stoletja je bila poglobitna potreba **usmerjati** izmeni ni tok iz obstoje ega enofaznega ali trifaznega omrežja v enosmerni tok za polnjenje akumulatorskih baterij in za napajanje enosmernih porabnikov, npr. cestnih in medmestnih železnic, elektroliz, galvan, enosmernih elektromotorskih pogonov (žage, mlini, industrija itd.). Elektri ni ventili, ki so nastopali kot osnovni gradbeni elementi (gradniki) v teh usmerniških napravah, so bili najprej **mehanski prekinjevalniki** (podobni komutatorjem pri kolektorskih strojih), nato pa **ionski**, zlasti **živosrebrovi ventili**. Šele po letu 1930 so se za eli pojavljati polprevodniški ventili, najprej **bakeroksidulni** in **selenski**, v petdesetih letih pa še **germanijevi** in nato **silicijevi**, ki sedaj prevladujejo. Na podro ju polprevodniških ventilov je »veliki met« uspel firmi General Electric leta 1958, ko je izdelala prvi krmiljiv silicijev ventil. Imenovala ga je Silicon Controlled Rectifier (SCR), ki ga poznamo pod imenom **tiristor**.

Vse ve je potrebe po krmiljenju in pretvarjanju elektri ne energije iz ene v drugo obliko z visokim energetske izkoristkom, z veliko natan nostjo in hitrostjo, je spodbudilo buren razvoj mo nostnih pretvornikov v zadnjih nekaj desetletjih. Ta razvoj so omogo ali povsem novi elementi (silicijeve diode, tiristorji, mo nostni tranzistorji) pa tudi tehnološki napredek v gradnji elementov in podsestavov za krmilni (upravljalni) del pretvornikov (integrirana polprevodniška vezja, polprevodniška logika, mikroprocesorji in ra unalniki, kvalitetni merilni dajalniki za napetost, tok, hitrost in pozicijo).

Ker je tako mo nostni, kakor tudi krmilni del sodobnih pretvornikov sestavljen iz polprevodniških elementov in ker ti pretvorniki ne rabijo le za usmerjanje, se je ta

tehni na disciplina iz »usmernikov« preimenovala v **mo nostno** (ali energetska) **elektroniko** (angl. Power Electronic, nem. Leistungselektronik).

Mo nostna elektronika je pomemben vezni len med proizvodnjo elektrine energije in med porabniki, kar kaže tudi sl. 1.1. Naprave mo nostne elektronike so praviloma vedno sestavljene iz dveh delov: iz **mo nostnega dela** (tj. energetskega dela pretvornika) in iz **krmilnega** (regulacijskega) **dela**. Prvi brez drugega ne more obratovati, razen pri zelo enostavnih pretvornikih, ki ne potrebujejo nobenega krmilnega dela (npr. navadni diodni usmerniki). Tako v mo nostnem, kakor tudi v krmilnem delu, so poglaviti gradniki monokristalni polprevodniki. V mo nostnem delu so to diode, tiristorji in mo nostni tranzistorji, v krmilnem in regulacijskem delu pa diode, tranzistorji, integrirana elektronska vezja ter mikrorunalniki. Ker so vsi ti gradniki sorodnega izvora, je kompatibilnost podsestavov, naprav in postrojov velika. To zagotavlja veliko obratovalno zanesljivost.



Slika 1.1: Mo nostna elektronika

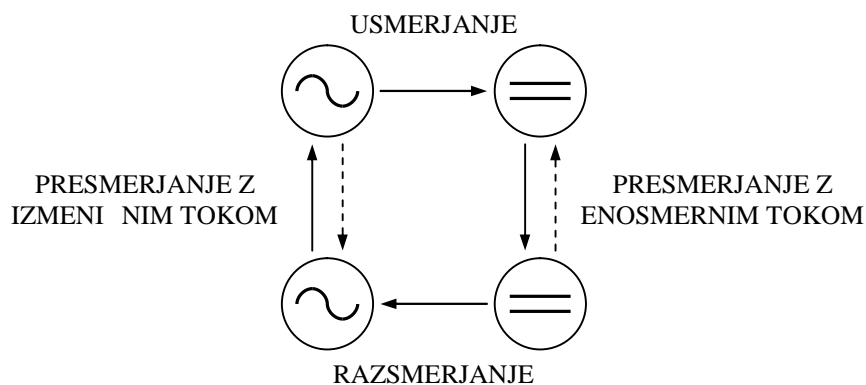
V em je poglavitna razlika med mo nostno in navadno elektroniko? Za razliko od vezij (naprav) navadne elektronike se v mo nostni elektroniki pretakajo velike energije in je primarna zahteva, da so zgrajene tako, da imajo kar najve jji **energetski izkoristek**. V preostali elektroniki (npr. v telekomunikacijah, raunalništvu itd.) energetski izkoristek nikoli ni primarno (ali sploh) pomemben.

1.2 Vrste pretvornikov in njihove naloge

Pretvorniki so naprave, ki omogoajo **pretvarjanje in krmiljenje** električne energije ob uporabi električnih tokovnih ventilov. Z njimi je možno krmiliti pretok električne energije med različnimi električnimi sistemi, kot so: aktivna električna omrežja (z lastnimi napetostnimi oziroma energetskimi izvori: generatorji, akumulatorskimi baterijami itd.) pasivna omrežja, porabniki itd.

Pri povezavi sistemov z izmeničnimi toki (napetostmi) in sistemov z enosmernimi toki (napetostmi) obstajajo štiri vrste pretvarjanja električne energije (sl. 1.2):

1. **Usmerjanje**, tj. pretvarjanje izmeničnega toka v enosmernega, pri čemer se energija vedno samo v **eni** smeri: iz izmeničnega v enosmerni sistem.
2. **Razsmerjanje**, tj. pretvarjanje enosmernega toka v izmeničnega, pri čemer se energija vedno samo v **eni** smeri: iz enosmernega v izmenični sistem.
3. **Presmerjanje z enosmernim tokom**, tj. pretvarjanje enosmernega toka oz. energije podanih parametrov (napetosti, polaritete) v enosmerni tok z drugimi parametri (napetosti, polaritete). Smer pretakanja energije je na oboje možna v obeh smereh.
4. **Presmerjanje z izmeničnim tokom**, tj. pretvarjanje izmeničnega toka (energije) določene napetosti, frekvence, števila faz in faznega zaporedja v izmenični tok (energijo) z drugačno napetostjo, frekvenco, številom faz in/ali faznega zaporedja. Pretakanje energije je na oboje možno v obeh smereh.

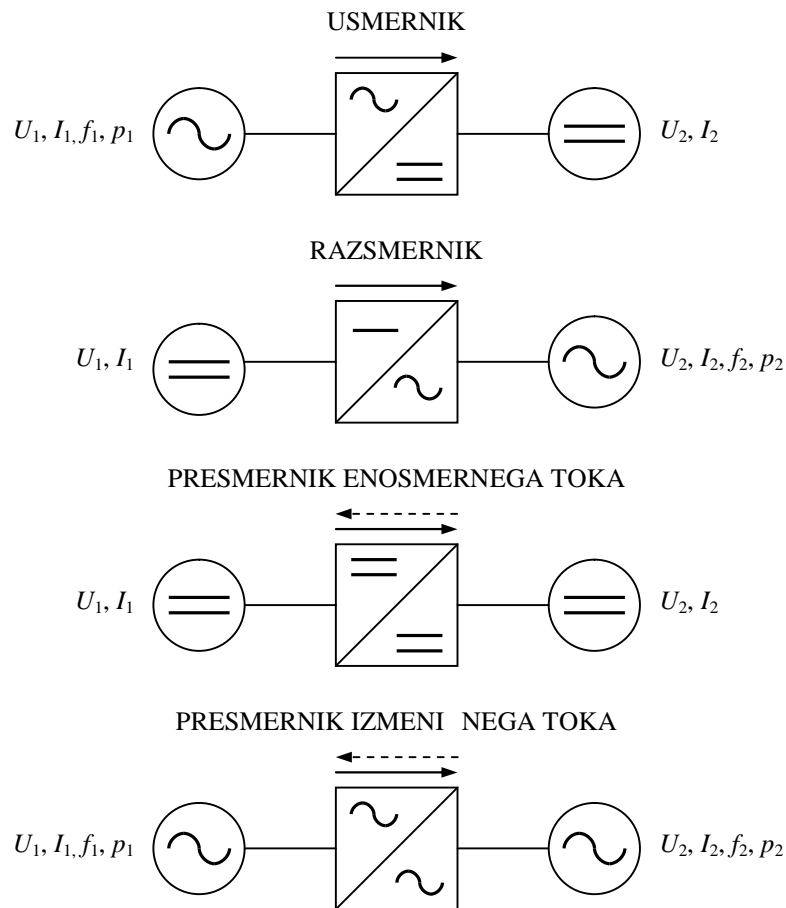


Slika 1.2: Vrste pretvarjanja električne energije

To kaže tudi sl. 1.2, kjer povezujejo pretvorniki le enosmerna in/ali izmenična električna omrežja, vendar so možne tudi povezave med aktivnimi omrežji (takimi z energetskimi izvori) in med pasivnimi omrežji ali navadnimi porabniki, ki nimajo svojega energetskega izvora in so zato brez napetosti, če jih ne napajamo iz pretvornikov (npr. na frekvenčni pretvornik priključen regulirani asinhronski motor).

Ta štiri pretvarjanja električne energije opravljajo ustrezni pretvorniki (sl. 1.3):

1. **Usmerniki** (nem. Gleichrichter, angl. Rectifier).
2. **Razsmerniki** (nem. Wechselrichter, angl. Inverter).
3. **Presmerniki enosmernege toka** («enosmerni presmerniki») (nem. Gleichstromumrichter, angl. DC/DC Converter).
4. **Presmerniki izmeni nega toka** («izmeni ni presmerniki») (nem. Wechselstromumrichter, angl. AC/AC Converter).



Slika 1.3: Vrste pretvornikov

Razen opisanih štirih poglavitnih vrst pretvornikov obstajajo še druge vrste naprav mo nostne elektronike, kot so:

5. **Stikala** za vklopjanje in izklopjanje enosmernih ali izmeni nih tokokrogov.
6. **Naprave za proizvodnjo jalove energije, aktivni filtri** itd.

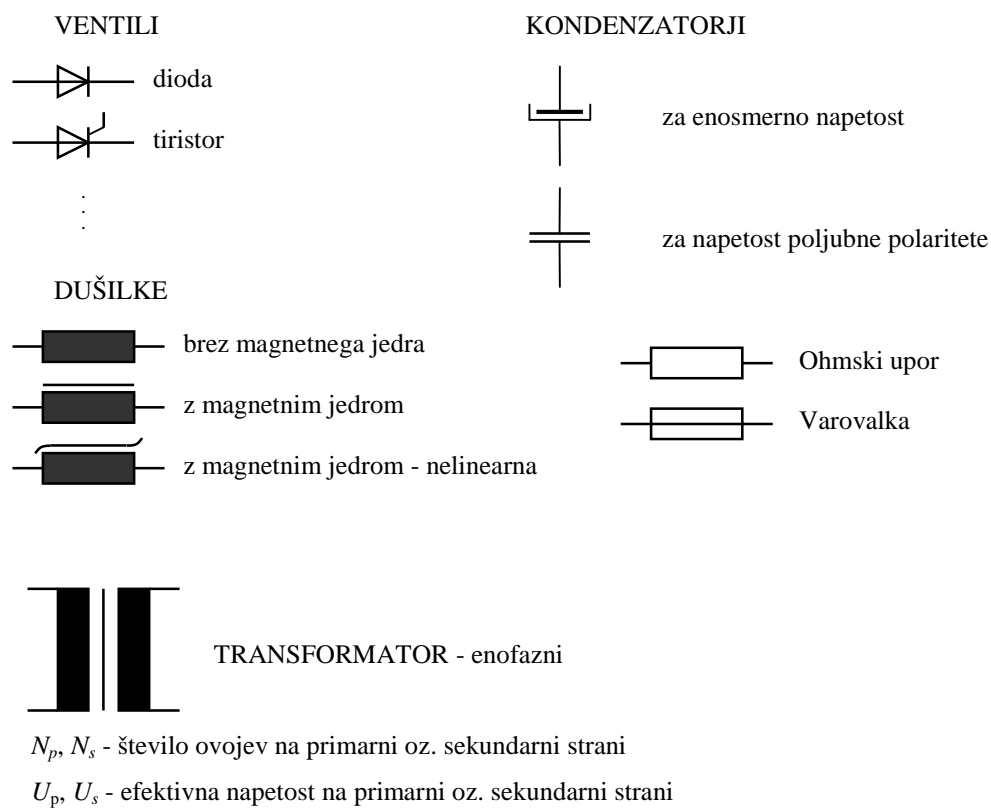
1.3 Gradniki

1.3.1 Vrste

Naprave energetske elektronike so sestavljene iz razli nih elementov ali gradnikov. Poglavitni med njimi so (sl. 1.4):

1. Elektri ni tokovni ventili
2. Transformatorji (Tr)
3. Dušilke (induktivnost L)
4. Kondenzatorji (kapacitivnost C)
5. Upori (upornost R)
6. Varovalke (Va),

ter še nekateri drugi, kot npr. prenapetostni odvodniki, napetostno odvisni upori, nelinearne dušilke itd.



Slika 1.4: Razli ni gradniki

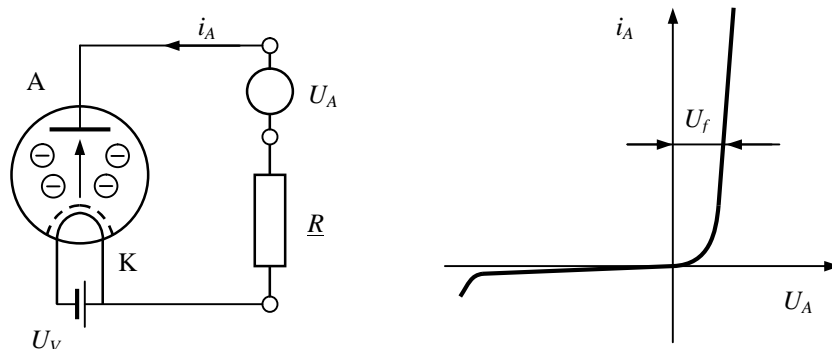
1.3.2 Ventili

Predno so se pojavili sodobni polprevodniški ventili, so gradili pretvornike z

- vakuumskimi,
- ionskimi in
- selenskimi ventili.

Vsi ti ventili so v primerjavi s sodobnimi silicijevimi diodami in tiristorji bistveno slabši, kar zadeva padec napetosti v prevodni smeri in izkoristke, zanesljivost in hitrost delovanja, gabaritne mere in težo, mehansko robustnost, življensko dobo, itd.

Sl. 1.5 kaže shematično **vakuumsko diodo**. V zaprti stekleni posodi (»elektronski cevi«) z zelo nizkim zračnim tlakom se nahajata anoda A in katoda K. Katoda je električno ogrevana z zunanjo pomožno napetostjo U_V , da žari in tako oddaja v okolico elektrone. Le-te lahko anoda, če je glede na katodo pozitivna, privlači. Elektroni, ki letijo od katode proti anodi, pomenijo električni tok i_A , katerega smer pa je po dogovoru risana v nasprotni smeri pretakanja elektronov. Narisana dioda ima lastnost »usmerjevalke«: zunanja izmenična (anodna) napetost U_A bo lahko poganjala tok v tokokrogu K-A- U_A -R-K le v eni (narisan!) smeri in to v določenih intervalih, ko je anoda A bolj pozitivna od katode K. V intervalih, ko je anoda bolj negativna od katode, pa tok ne bo tekkel (sl. 1.5b).

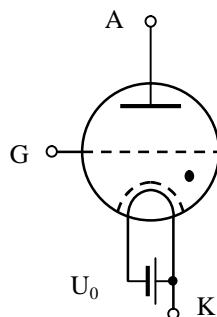


Slika 1.5: Vakuumski ventil z vročo katodo – dioda: (a) shema, (b) statična i/u -karakteristika

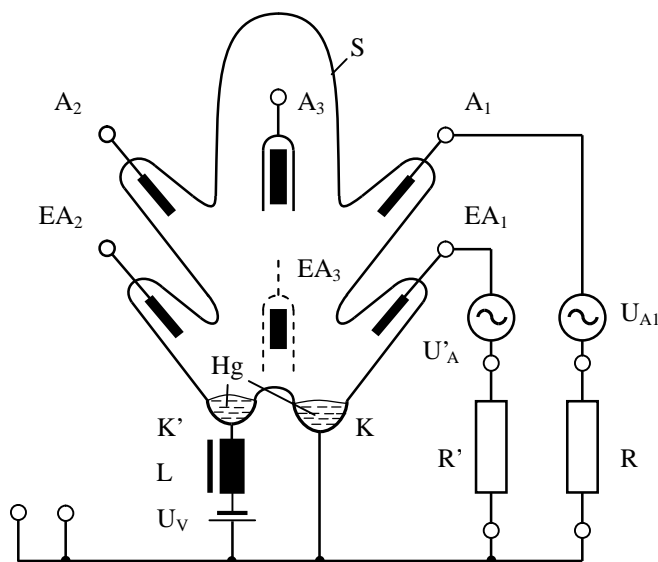
Zaradi relativno majhne emisijske sposobnosti vročih katod so dopuščale vakuumske diode le relativno majhne toke (velikostnega razreda 0,5 A), imele pa so tudi velik padec napetosti v prevodni smeri U_F (okrog 100 V). V tem pogledu so bili boljši ionski ventili. Polnjeni so bili ali z žlahtnimi plini (argon, ksenon) ali z živosrebreno paro pri nizkem tlaku. Katoda pa je bila ali ogrevana (žarilna) ali v obliki živosrebrega »jezerca«. Pri preletu od katode na anodo so elektroni zadevali ob prisotne plinske molekule in jih ionizirali. Tako so nastali dodatni nosilci elektnine. Pojav ionizacije je plazovit. Zato govorimo o plazmi ali »vžigu«. To plazmo ali »vžig« ventila pa je bilo možno prepričati (kljub pozitivno polarizirani diodi), če je bila med katodo in anodo

nameš ena negativno polarizirana »mrežica«. Tako so iz navadnih diodnih nastali triodni (z anodo, katodo in krmilno mrežico-angl. gate G) oziroma krmiljivi ventili. Neugodno je bilo le to, da je krmilna elektroda G, ko je ventil že za el prevajati elektri ni tok, izgubila svojo krmilno lastnost in z njo ni bilo ve mogo e izklopiti prevajajo ega ventila (podobno, kot je to sedaj pri tiristorjih).

Na sl. 1.6, ki kaže simbol **plinske triode – tiratrona**, vidimo tudi principiarno zgradbo. Vrisana pika ozna uje, da imamo opraviti z ionskim ventilom. Ogrevana katoda emitira elektrone, ki pri svojem preletu proti anodi plazovito ionizirajo plinske molekule. Povzro ijo torej plazmo ali »vžig«, seveda ob pogoju, da sta anoda A in krmilna elektroda G pozitivni. Tiratrone so v preteklosti zelo veliko uporabljali. Omogo ali so toke do približno 20 A in zaporne napetosti do približno 10 kV. Notranji padec napetosti med prevajanjem je bil približno 20 V.



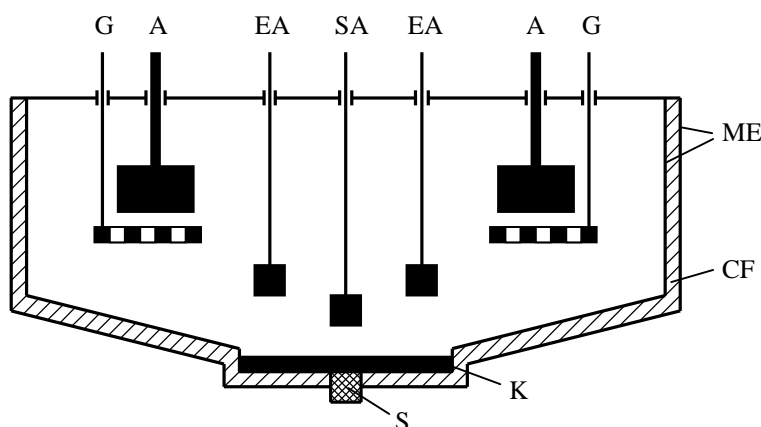
Slika 1.6: Simbol plinske triode – tiratrona



Slika 1.7: Trianodni nekrmljivi živosrebrov ventil

Veliko ve jo emisijo elektronov od vro ih katod omogo a elektri ni oblok. To izkoriš ajo **živosrebrovi ventili**. Sl. 1.7 kaže principiarno zgradbo takega ventila. V posebej oblikovani stekleni posodi z zelo nizkim parnim tlakom se na dnu nahajata dve

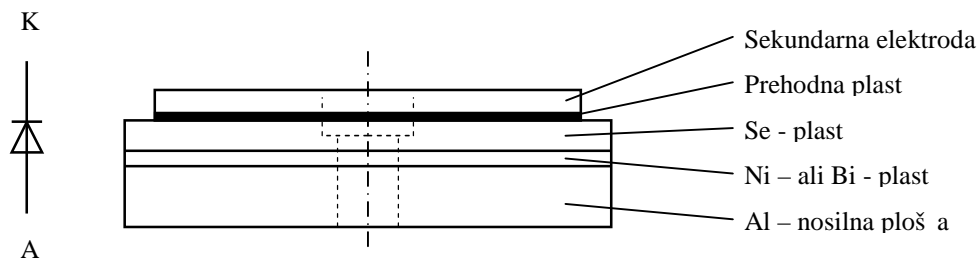
»jezerci« iz živega srebra, v posodo pa so zataljene še tri anode (A_1 , A_2 in A_3). Če priklopimo med obe katodi K in K^I neko pomožno napetost U_V ter nato najprej posodo nagnemo in spet zravnamo, se bosta »jezerci« najprej združili in nato spet razdružili in tedaj bo pri trganju tokoroga med »jezercema« nastal električni oblok, ki bo zelo intenzivno oddajal v okolico elektrone. Ena od trenutno pozitivnih anod bo te elektrone pospešila proti sebi in prišlo bo do že opisane plazovite ionizacije, tj. do »vžiga« ventila. Tok bo tekkel v tokokrogu $K-A-R-K$. Na katodi K se pojavi zelo svetla »katodna lisa«, ki zelo intenzivno oddaja elektrone, mnogo bolj, kot jih lahko ogrevana katoda (do 10^4 A/cm²). Mimo tega pa se takšna katoda tudi sama regenerira, saj se uparjeni delci, tj. molekule Hg, na hladnih stenah posode ponovno utekočinijo in padajo nazaj v jezerce. Ionizirane plinske molekule Hg sodelujejo pri prevajanju električnega toka znotraj posode. Anoda je lahko samo ena ali pa jih je vgrajenih tudi več za večfazno delovanje ventila (npr. za enofazno, dvofazno, trifazno itd. usmerjanje). V posodi se nahajajo še tri pomožne anode (EA_1 , EA_2 , EA_3) s svojimi pomožnimi anodnimi napetostmi (U_{A1} , U_{A2} , U_{A3}). Njihova naloga je vzdrževati nek minimalni tok praznega teka tedaj, ko odklopimo fazna bremena in bi zato prenehala vsakršna katodna emisija (katodna lisa bi ugasnila) in bi bilo potrebno ventil vsakič ponovno vžigati.



Slika 1.8: Trianodni krmiljivi živosrebrov ventil z dvostensko kovinsko posodo: A-glavni anodi, EA-pomožni anodi, G-krmilni elektrodi, K-živosrebрова katoda, S-vžigni sistem, SA-vžigna elektroda, ME-dvostensko kovinsko ohišje, CF-hladilna tekočina

Podobno kot tiratroni so lahko tudi živosrebri ventili opremljeni še s krmilno elektrodo G, ki ima isto funkcijo kot pri tiratronih. Tako dobimo **krmiljive živosrebrove ventile**. Nadaljnja delitev živosrebrih ventilov je še glede na posodo (steklenu-kovinska), glede na vakuum (stalen ali sprotno vzdrževan s posebno vakuumsko napravo), glede na hlajenje posode (naravno-pospešeno in zračenje) ter glede na način zaganjanja: mimo že opisanega na način z nagibanjem posode obstajajo še nekateri drugi (elektromehanski in električni vžig, itd.). Zato so posamezne firme dale svojim ventilom z različnimi imeni, npr. ignitron, ekscitron, itd. Živosrebrove ventile so gradili za tokove do več deset kA in za napetosti do več deset kV. Notranji padci napetosti pri prevajanju so bili okrog 20 V. Do pojavit tiristorjev so živosrebri ventili obvladovali sceno v območju srednjih in velikih moči. Sl. 1.8 kaže shematični trianodni krmiljivi živosrebrov ventil s kovinsko posodo.

Polprevodniški ventili so se razvijali postopoma. Najprej sta se pojavila **baker-oksidualni** in **selenski**, sledili pa so jima **germanijevi** in na koncu **silicijevi ventili**. V preteklosti je bil zlasti pomemben selenski ventil. Njegovo zgradbo kaže sl. 1.9. Velikost nazivnega prevodnega toka je odvisna od velikosti, tj. od površine ploš e. Gostota znaša nekaj 100 mA/cm^2 . Zaporna napetost je okrog 20 V/ploš o , napetostni padeč pri prevajanju pa približno $1,2 \text{ V}$. Ve je toke in ve je napetosti je bilo možno dose i z neproblemati no vzporedno oz. zaporedno vezavo ve elementov (ploš). Dobra stran selenskih ventilov je bila njihova odpornost na udarne (transientne) prenapetosti, slabost pa precejšnja temperaturna odvisnost nekaterih elektri nih parametrov (pri temperaturah nad 70°C) in vpliv staranja (pri daljši neuporabi je bilo treba selenske ploš ice predhodno formirati nekaj ur tako, da so bile obremenjene z znižano napetostjo in tokom).



Slika 1.9: Principialna zgradba selenskega ventila (ploš e)

Sodobni ventili so **silicijeve diode**, **tiristorji** in **mo nostni tranzistorji**.