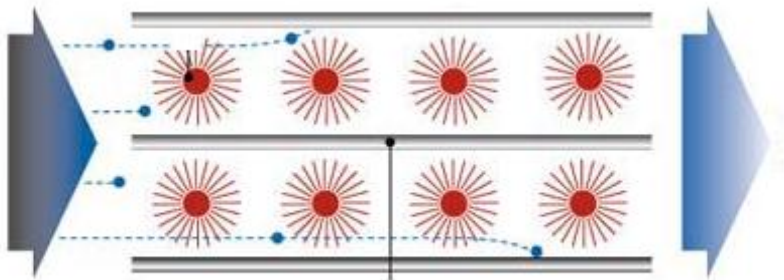


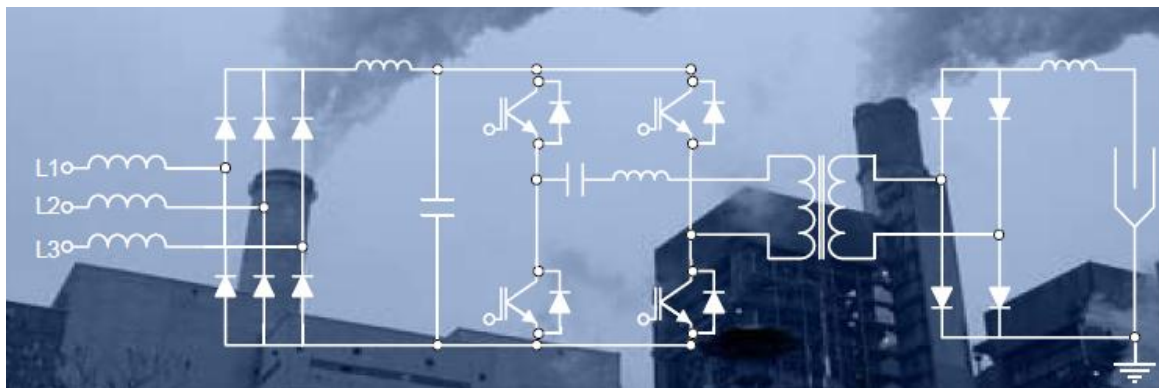


ELEKTROSTATIČKI IZDVAJAČI



UVOD

- Snažan zamah proizvodnje električne energije poslednjih decenija, na bazi sagorevanja fosilnih goriva, a naročito uglja, povećao je interesovanje društva za moguće posledice ovog razvoja i to naročito na one koje proističu iz emisije znatnih količina materija štetnih po čoveka, biljni i životinjski svet.
- Proizvodnja električne energije u termoelektranama (TE), proizvodnja toplotne energije u gradskim toplanama ali i u industrijskim postrojenjima, uslovljena je korišćenjem ugljeva, najčešće lignita niske kalorične moći.
- Stoga su najveći izvori emisije štetnih materija u atmosferi velika kotlovska ložišta TE i toplana, postrojenja cementara, metalurgije, čeličane i sl.
- Pri sagorevanju čvrstih goriva, uporedo sa oksidima sagorljivih elemenata (ugljenika, vodonika i sumpora), u atmosferu dospevaju čestice pepela, nesagorelog uglja, oksidi azota i sumpora, gasovi na bazi isparljivih organskih jedinjenja, gasovi na bazi policikličnih aromatičnih hidrokarbonata, teški metali od kojih dominiraju živa (Hg) i njena jedinjenja, kao i drugi polutanti u manjim količinama



- Emisija štetnih materija pri sagorevanju čvrstih goriva zavisi od mineralnog sastava goriva, načina sagorevanja, tipa ložišta i efikasnosti njihovog izdvajanja
- Tipično za ugalj donje ogrevne moći od 25MJ/kg procentualni sastav otpadnih materija je sledeći: ugljena prašina 62%, pepeo 13%, vlaga 9%, kiseonik 9%, vodonik 4%, azot 1.5%, sumpor 1% i ostatak teški metali (živa) i gasovi fluor i hlor
- **I pored značajnog efekta, izdvajanje čvrstih materija nije dovoljno da zadovolji sve potrebne zahteve zaštite životne sredine!!!**
- Kao što je rečeno značajan uticaj na zagađenje imaju sumpor koji zajedno sa kiseonikom formira štetni gas sumpor dioksid SO_2 .
- Slično važi i za azot koji sa kiseonikom formira okside tipa NO_x .
- Pošto treba očekivati neprekidno smanjenje GVE u bliskoj budućnosti, pravi je trenutak za razmatranje prihvatljivih i perspektivnih tehnologija za smanjenje emisije pomenutih polutanata.

TIPIČNE VREDNOSTI EMISIJA

- Tipične vrednosti emisije čvrstih čestica na izlazu kotlova na većini termoblokova Elektroprivrede Srbije (EPS-a) se kreću u opsegu $2\text{g} \div 40\text{g}/\text{m}^3$.
- Na TE “Morava” na izlazu kotla MAX koncentracija čestica i nesagorelog otpada je oko $40\text{g}/\text{m}^3$
- Izdvajanjem čestica ugljene prašine i pepela se značajno smanjuje negativni uticaj otpadnih materija, koje nastaju kao produkt sagorevanja u pomenutim postrojenjima.
- Svetske norme koje se sve više prihvataju i kod nas zahtevaju granične vrednosti emisije (GVE) manje od $50\text{mg}/\text{m}^3$.
- TENDENCIJA GVE ka vrednosti $25\text{mg}/\text{m}^3$.

ELEKTROSTATIČKO IZDVAJANJE?

- Elektrostatičko izdvajanje je jedna od najpraktičnijih metoda za izdvajanje čestica ugljene prašine i pepela iz struje dimnih gasova na kotlovskim postrojenjima termoelektrana (TE) i toplana.
- Izdvajanjem čestica ugljene prašine i pepela se značajno smanjuje negativni uticaj ovih otpadnih materija na ekosistem.
- Svetske norme, koje su prihvaćene i kod nas, zahtevaju granične vrednosti emisije (GVE) manje od 50mg/m³, a u nekim zemljama Evrope, manje čak i od 25mg/m³.
- Pošto treba očekivati neprekidno smanjenje GVE u bliskoj budućnosti, pravi je trenutak za razmatranje prihvatljivih i perspektivnih tehnologija, kao i razvoj novih energetski efikasnih tehnologija za smanjenje emisije dimnih gasova ali i ostalih polutanata (oksida sumpora, azota.....)

SUBJEKTIVNO VIZUELNO „OPAŽANJE“ KONCENTRACIJA na TE „MORAVA“



50mg/m³



5000mg/m³



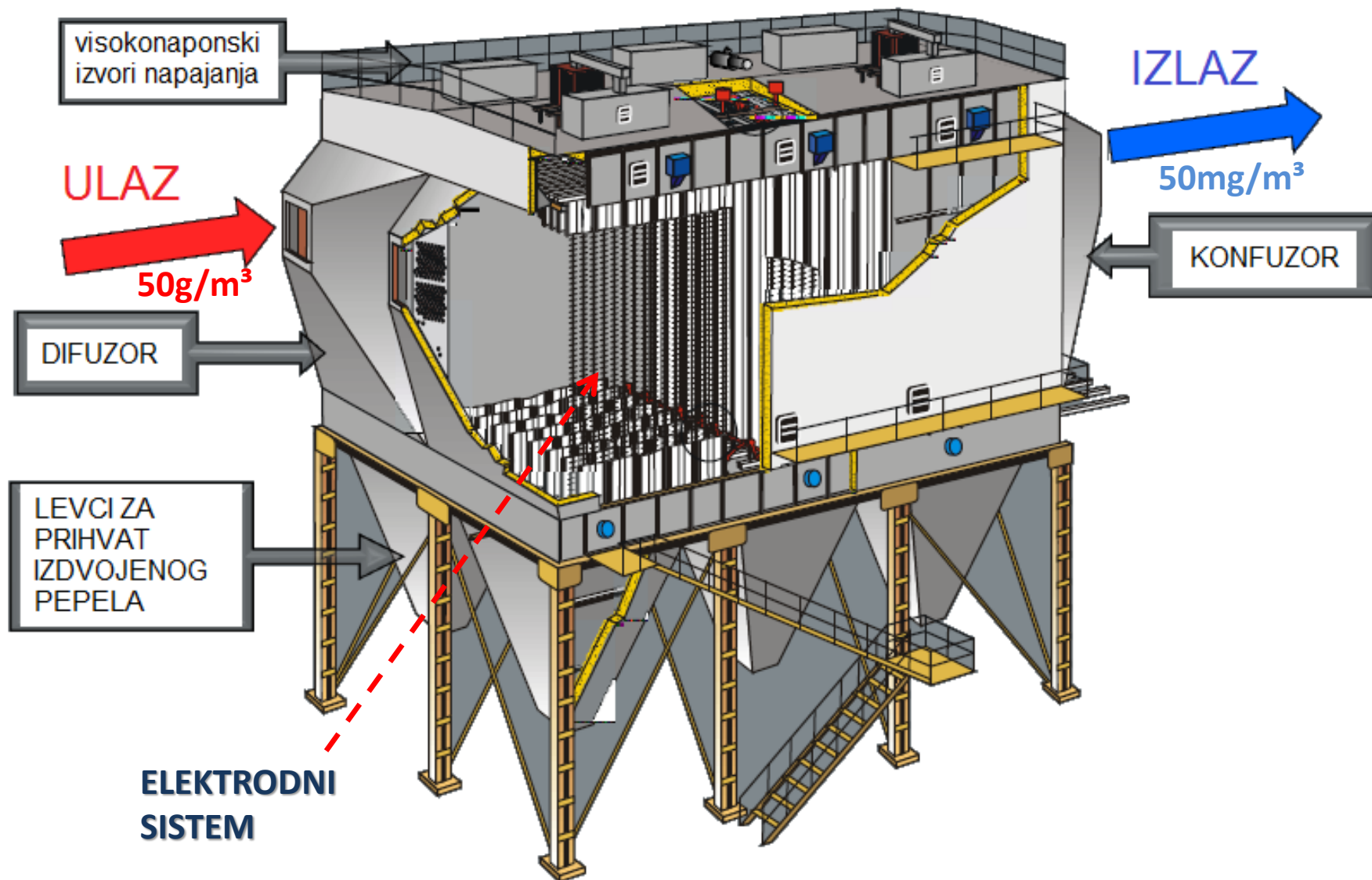
150mg/m³

ELEKTROSTATIČKI IZDVAJAČI (ELEKTROSTATIČKI FILTRI)?

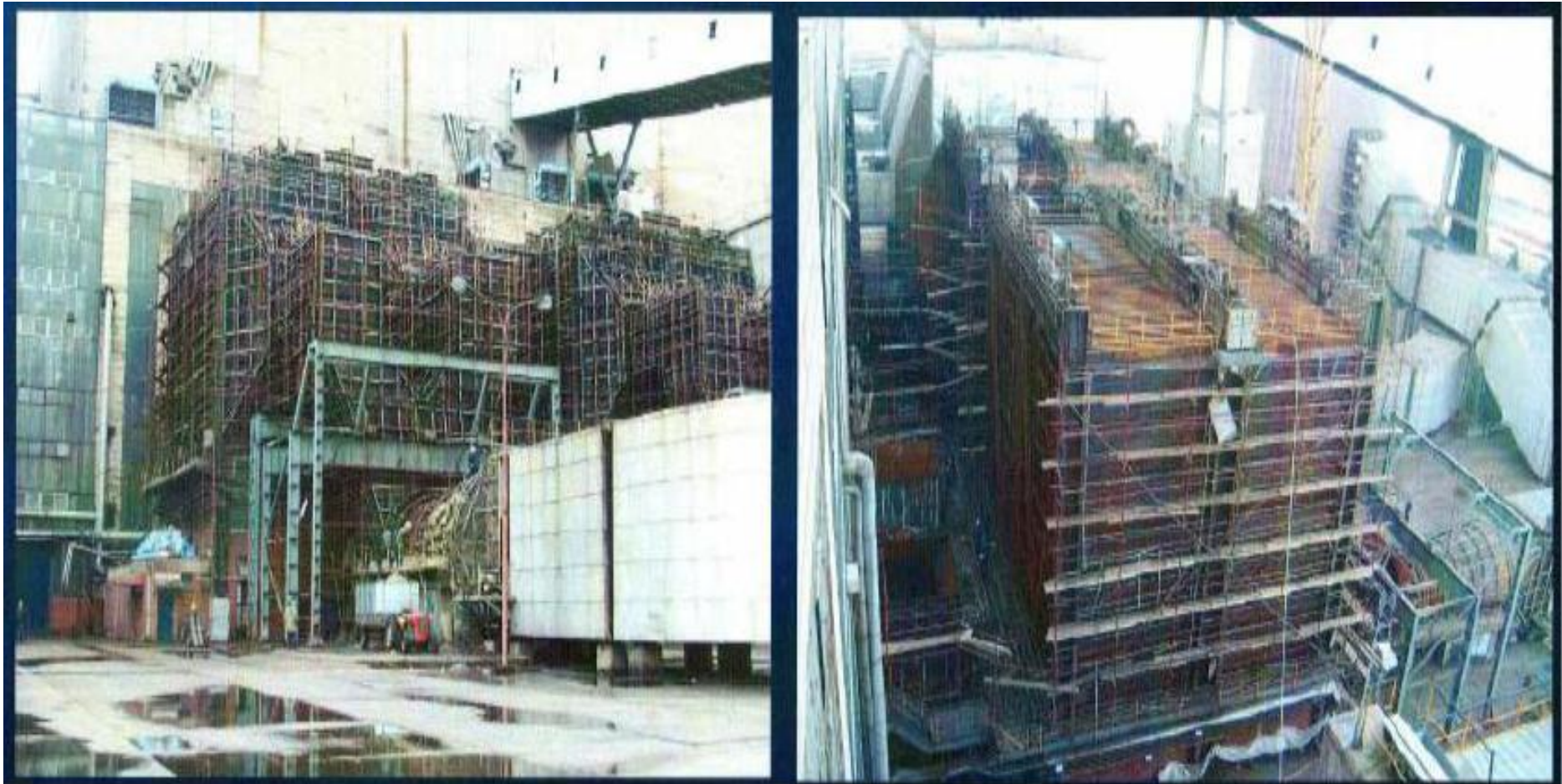
- Sprečavanje rasipanja čestica ugljene prašine i letećeg pepela iz dimnjaka pomenutih postrojenja, odnosno njihova "kolekcija" se ostvaruje *elektrostatičkim izdvajačima (filtrima ili precipitatorima)*
- *Elektrostatički izdvajači (ESI)*
- U nekim slučajevima se koristi termin *ELEKTROSTATIČKI FILTRI (ESF)*
- „FILTRI“- u smislu filtracije (čišćenja) zagađenog dimnog gasa koji dolazi iz kotla termoelektrane ili toplane; iz tehnološkog procesa za proizvodnju cementa; iz tehnološkog procesa za proizvodnju čelika (čeličana)
- ENGL: Electrostatic Precipitators (ESP)
- Pored izdvajanja čestica, u novije vreme ESI su optimizovani i za odvajanje taložnih čvrstih produkata praha sastavljenog od submikronskih čestica sulfata i nitrata (produkti odsumporavanja i denitrifikacije), kao i u sistemima reaktora sa neuravnoteženom nisko temperaturnom plazmom (NTP)

ELEKTROSTATIČKI IZDVAJAČI : IZGLED, VELIČINA I CENA (tipične vrednosti)

BLOK SNAGE 300MW, 2000t čelika, 10miliona EUR, $V=8000\text{m}^3$

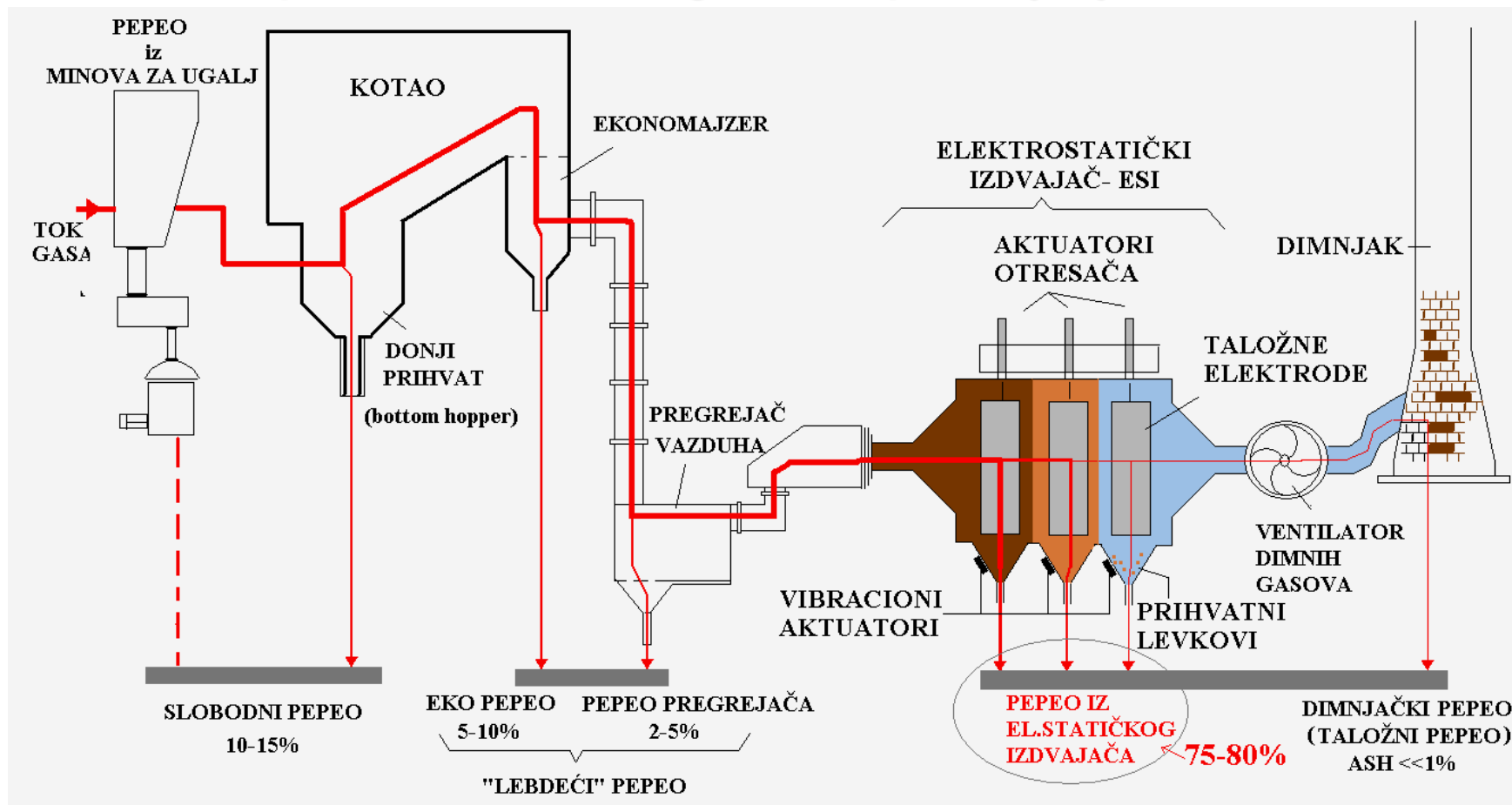


A KAKO TO IZGLEDA U STVARNOSTI?



DOMAĆI ELEKTROSTATIČKI FILTER U IZGRADNJI

Tipična distribucija pepela u procentnom iznosu na jednom tipičnom termoenergetskom postrojenju



- Najveći deo pepela 75-80%, je lociran u prihvratnim levcima koji se nalaze direktno ispod visoko naponskih (VN) izdvajačkih komora ESI.
- Veoma mali deo pepela (< < 1%) se taloži na dnu izlaznog dimnjaka

20-25% težine uglja je sadržano u dimnom gasu!!

**Visokonaponske (VN)
napojne jedinice**

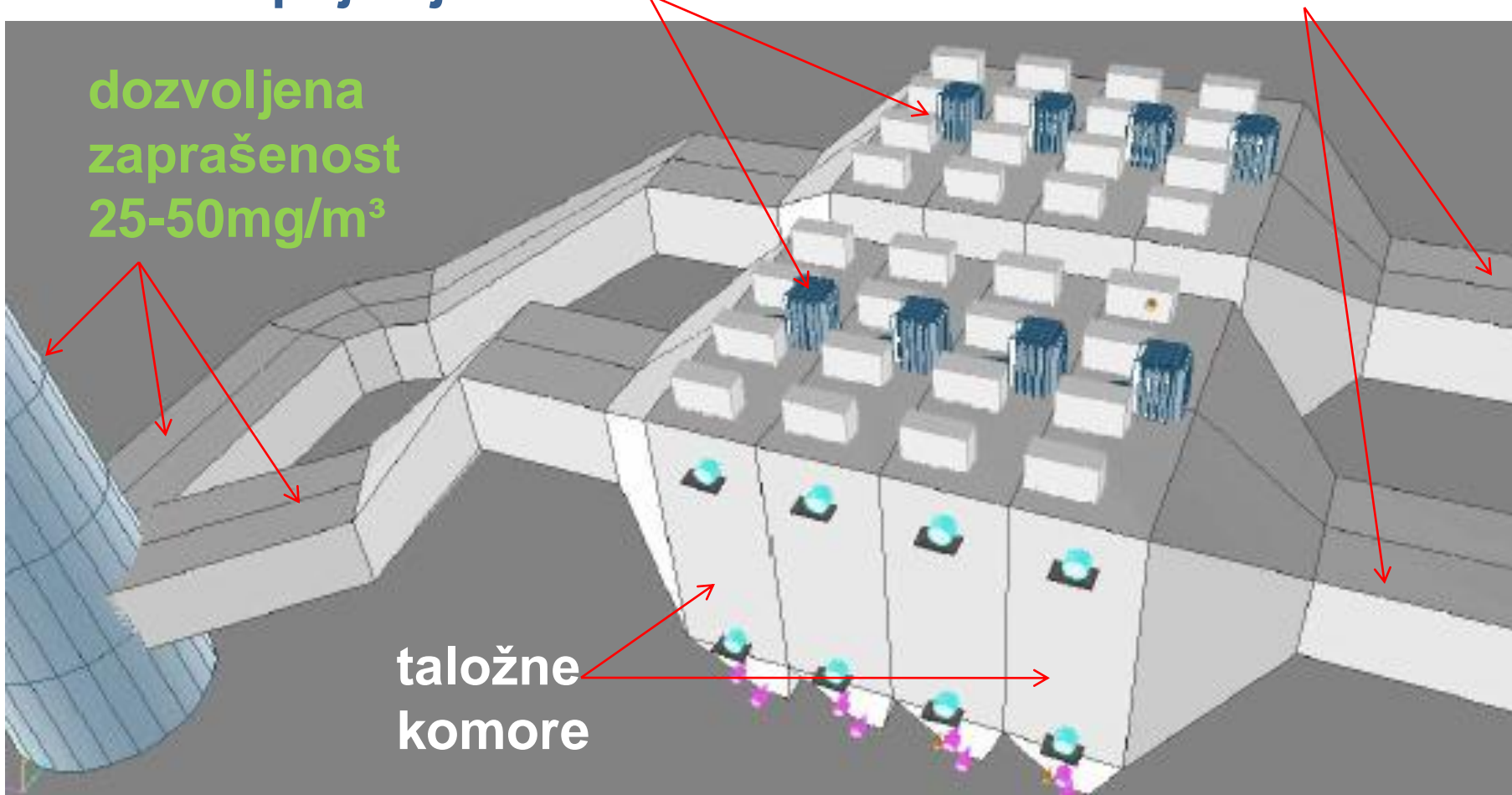
**zapašenost na izlazu
kotla 30-50g/m³**

**dozvoljena
zapašenost
25-50mg/m³**

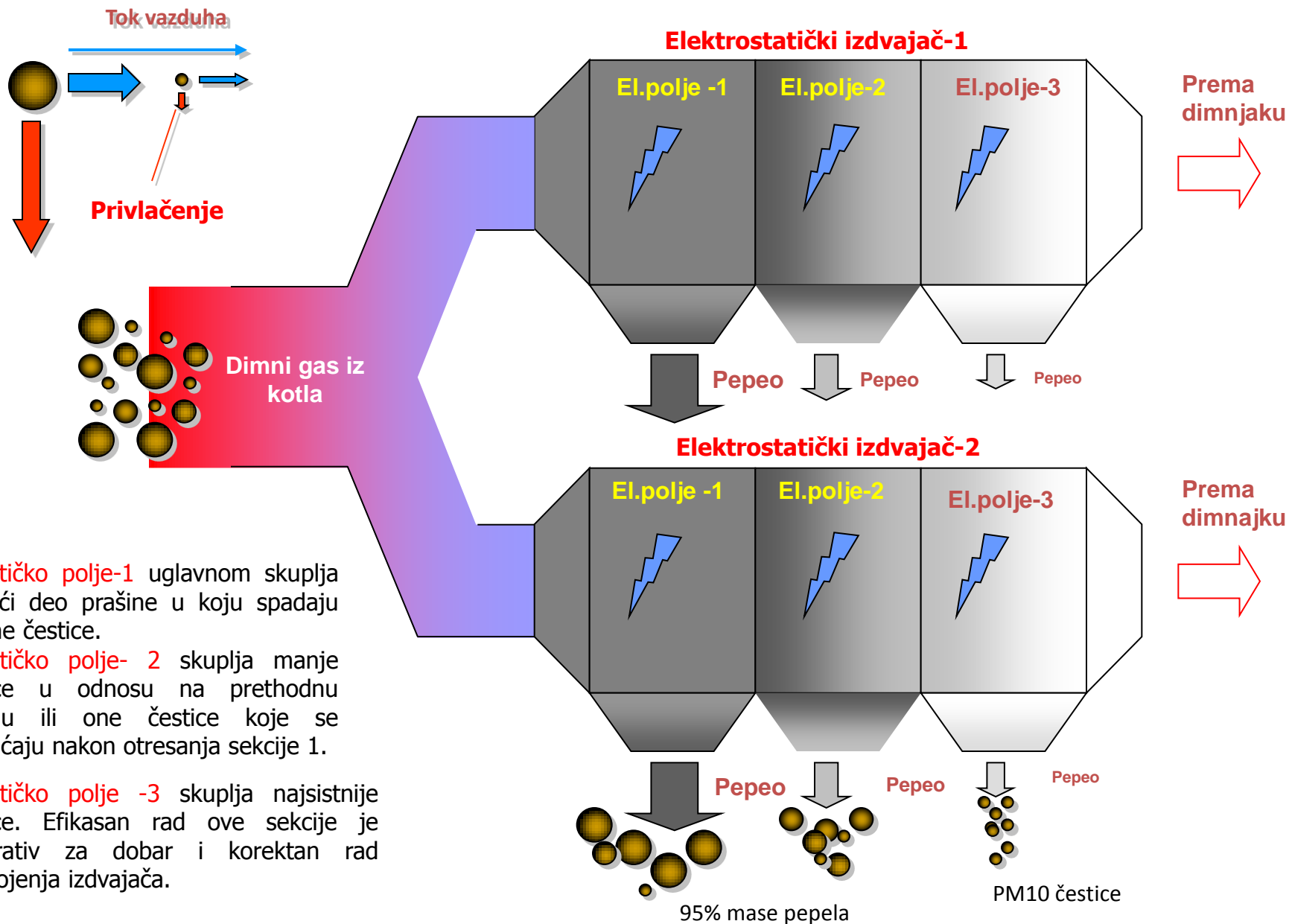
**taložne
komore**

TIPIČNO POSTROJENJE ELEKTROSTATIČKIH IZDVAJAČA (ESI)

50mg/m³: 50g/m³=1:1000 → 0.1% => **efikasnost izdvajanja 99,9%**



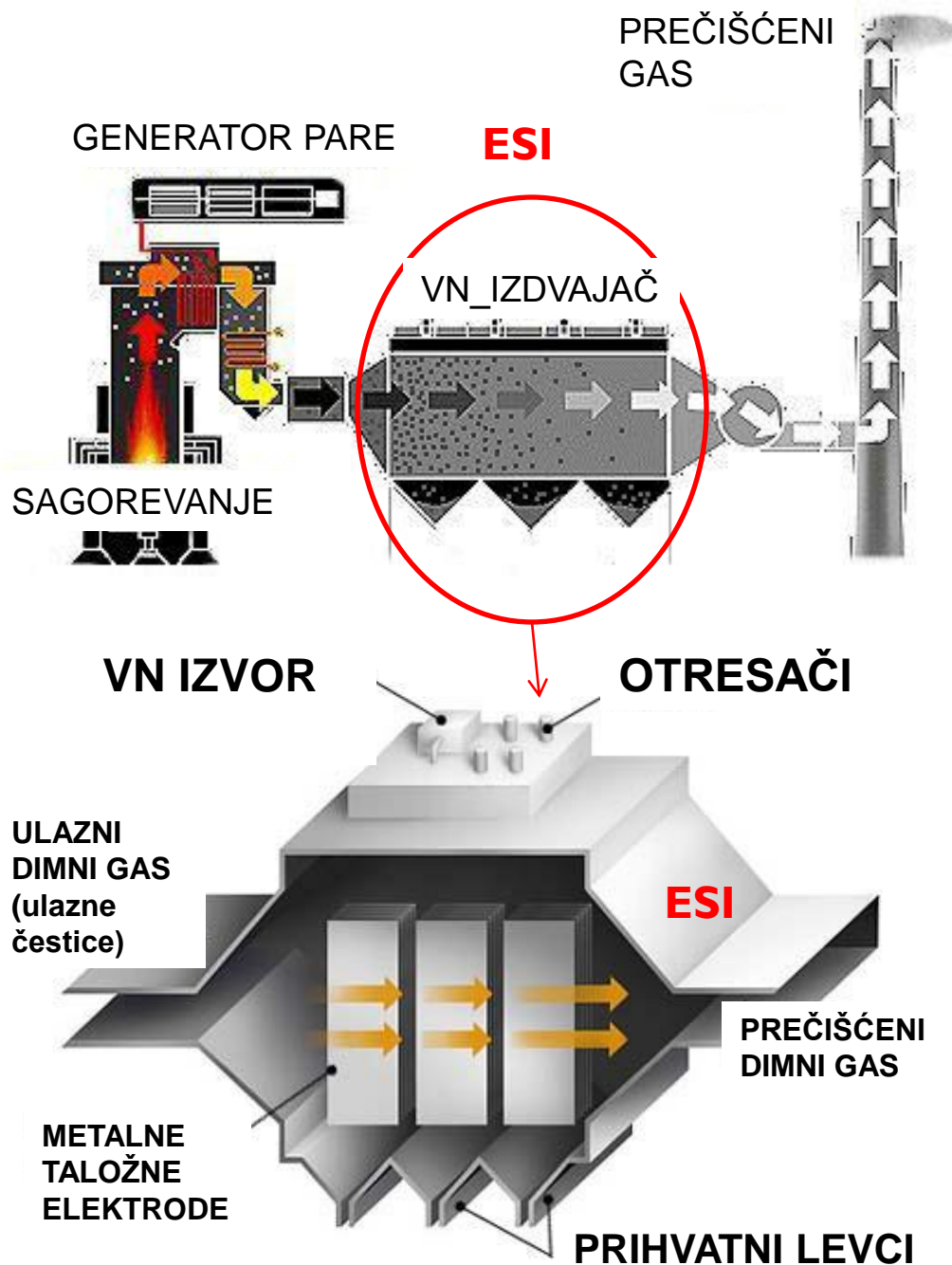
Trosekcijski elektrostatički izdvajač sa dve paralelne grane



El.statičko polje-1 uglavnom skuplja najveći deo prašine u koju spadaju krupne čestice.

El.statičko polje- 2 skuplja manje čestice u odnosu na prethodnu sekciju ili one čestice koje se povraćaju nakon otresanja sekcije 1.

El.statičko polje -3 skuplja najsitnije čestice. Efikasan rad ove sekcije je imperativ za dobar i korektan rad postrojenja izdvajača.



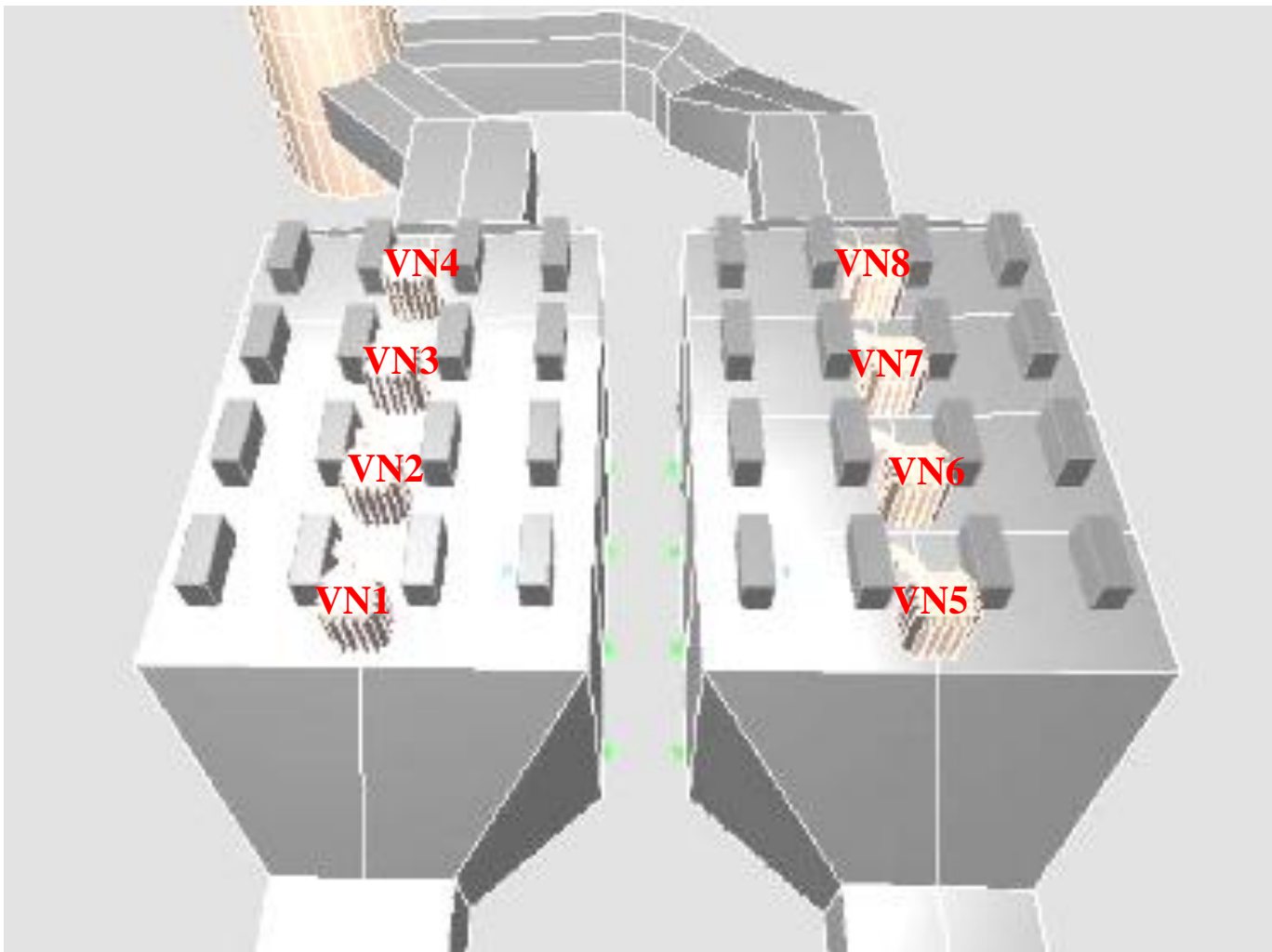
POTREBNA ELEKTRIČNA SNAGA ZA IZDVAJANJE PRODUKATA?

Odvajanje svih pomenutih tipova čvrstih produkata se ostvaruje jakim elektrostatičkim poljem koje se formira u taložnoj komori.

U taložnoj komori nalaze se dve vrste elektroda: taložne i emisione između kojih se dovode relativno visoki jednosmerni naponi 40-100kV.

- Potrebne struje za efikasno elektrostatičko izdvajanje po sekciji (**TALOŽNOJ KOMORI**) su reda veličine 0.5-2A (tipično 1A)
- Snaga potrebna za izdvajanje na jednoj sekciji tipično $100\text{kV} \times 1\text{A} = 100\text{kW}$

Energetski zahtevi za jedno tipično postrojenje elektrostatičkih izdvažača



- Dve grane
- Svaka ima po 4 sekcije
- Svaka sekcija sadrži po jednu VN jedinicu

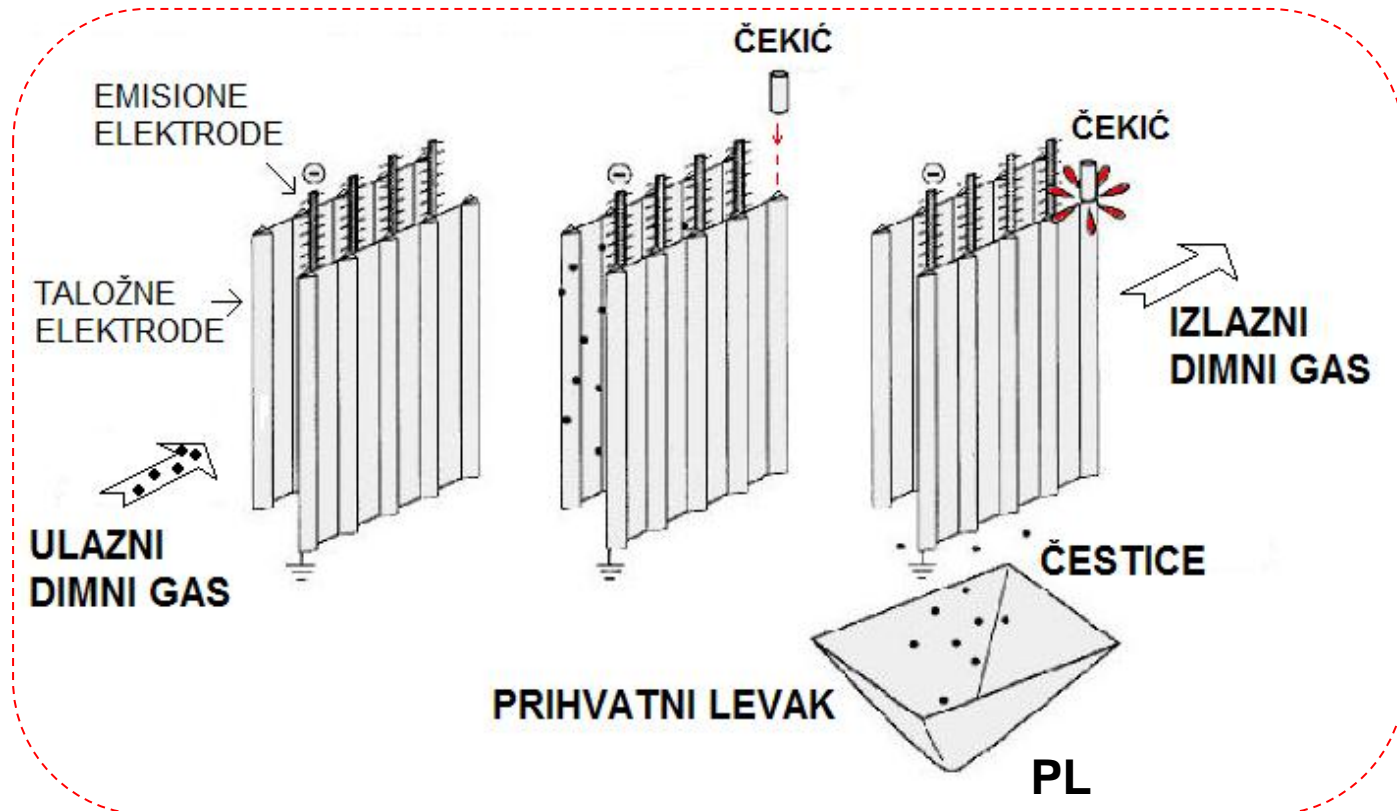
**Izlazni parametri
VN jedinica (tipično
za jedan blok na
TE):**

- taložne komore
100kV DC /1A
Izl. snaga \approx 100kW
- ulazno napajanje
3x400V, 50Hz
120-130kVA

**-8 VN jedinica
troši ukupnu
prividnu snagu
 $8 \times 120 \text{kVA} \approx 1 \text{MVA}!!!$**

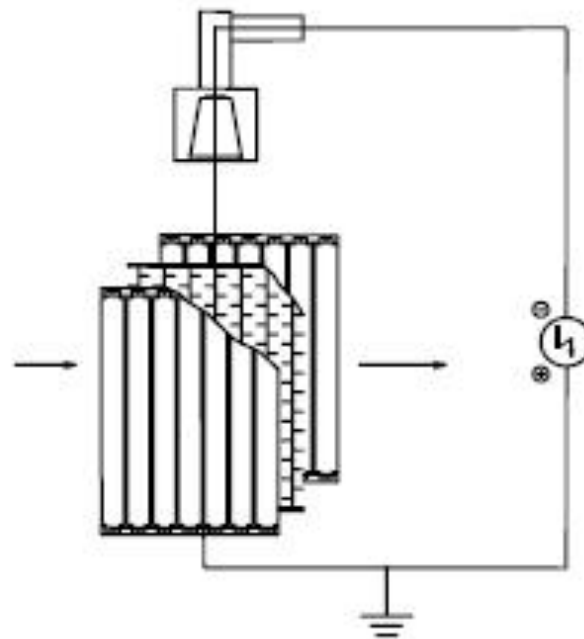
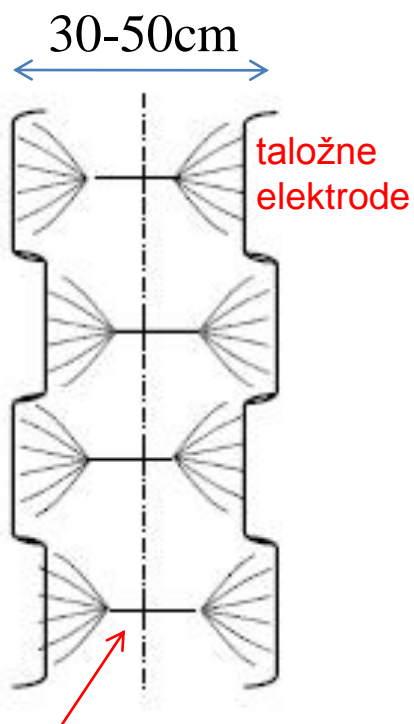
Sastav postrojenja sa 8 visokonaponskih (VN) jedinica za napajanje elektroda

SASTAV TALOŽNE KOMORE



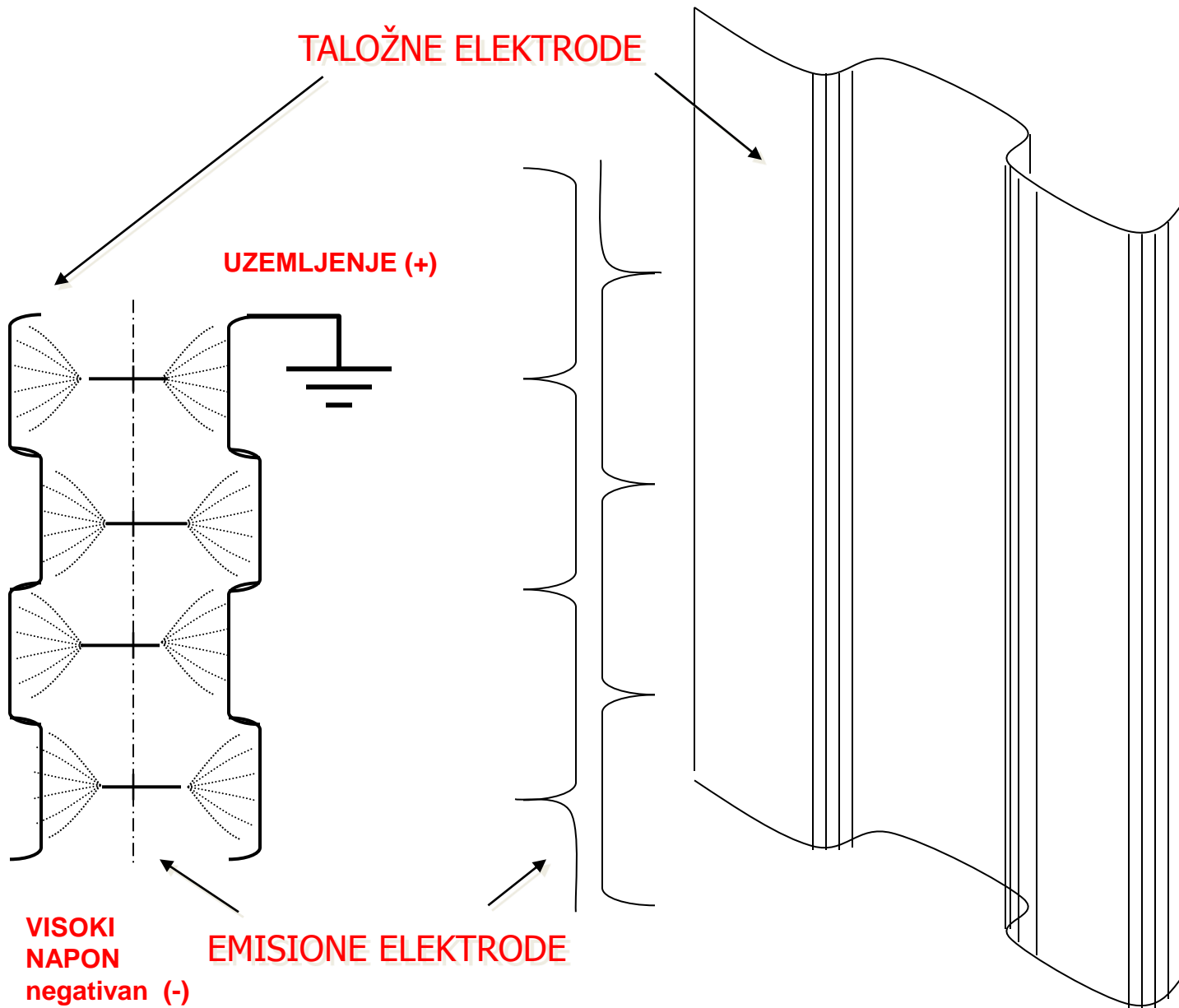
- Emisione elektrode emituju jako elektrostatičko polje; čestice se kolektuju (skupljaju na taložnim elektrodama)
- Taložne elektrode su izložene povremenim mehaničkim udarima (vrši se PERIODIČNO OTRESANJE)
- Periodičnim otresanjem nataloženog materijala sa taložnih i emisionih elektroda ostvaruje se njegovo nagomilava nje u PRIHVATNIM LEVCIMA (PL).
- Kada se izvrši otresanje elektroda, izdvojeni pepeo pada u levkove i privremeno se skladišti pre nego što se odloži na deponiju ili ponovo koristi u nekim tehnologijama (na primer u proizvodnji cementa).
- Izdvojeni pepeo je potrebno što pre ukloniti da bi se izbegli: (1) njegovo ponovno vraćanje u taložnu komoru, (2) njegovo otvrdnjavanje i (3) kompaktiranje, čime bi došlo do teškoća za njegovo dalje uklanjanje.

Princip elektrostatičkog izdvajanja



- **Emisione elektrode** se dovode na negativan napon $-50\text{kV} \dots -100\text{kV}$
- Korona stvara negativne jone, čestice dimnog gasa se naelektrisavaju difuzijom i električnim poljem
- Električno polje potiskuje ka uzemljenoj taložnoj elektrodi migracionom brzinom vrednosti $10\text{-}20\text{cm/s}$

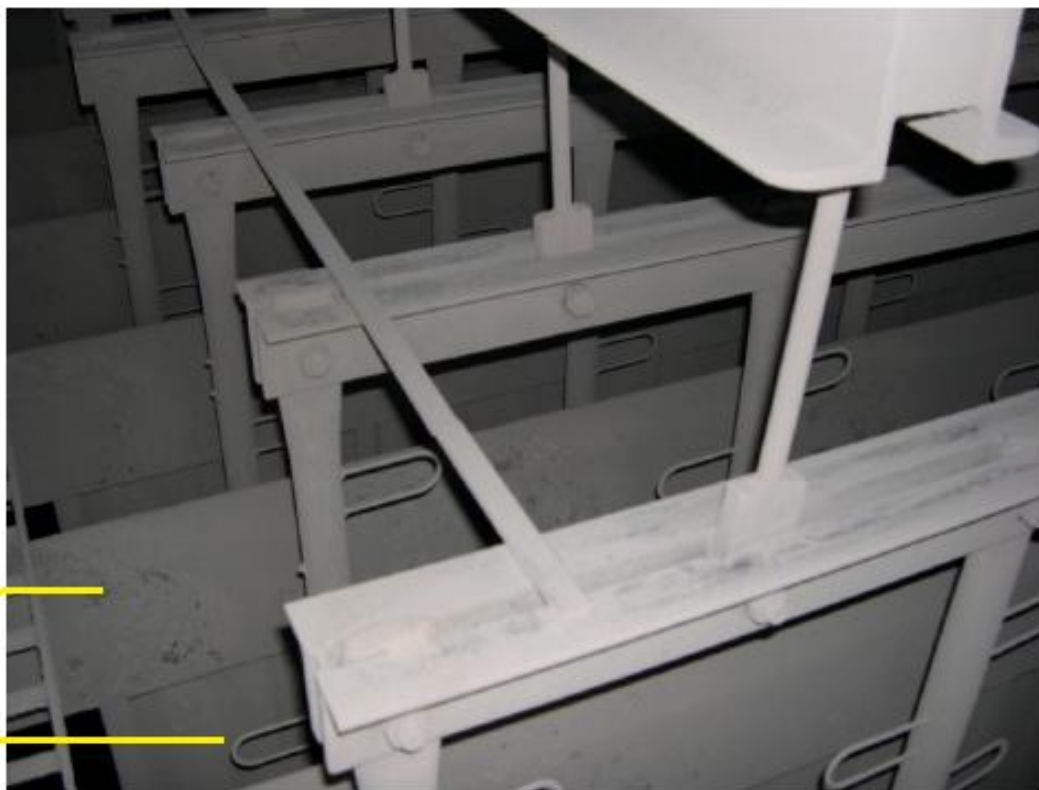
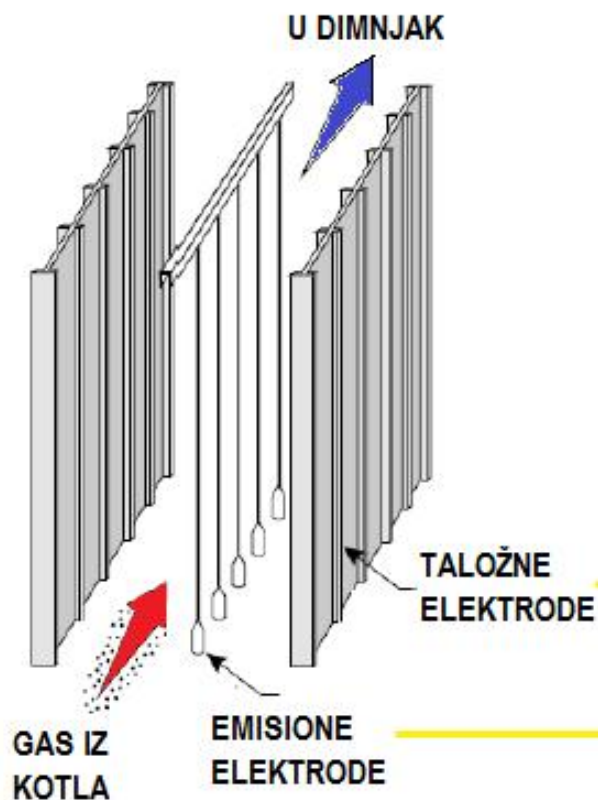
EMISIONE I TALOŽNE ELEKTRODE



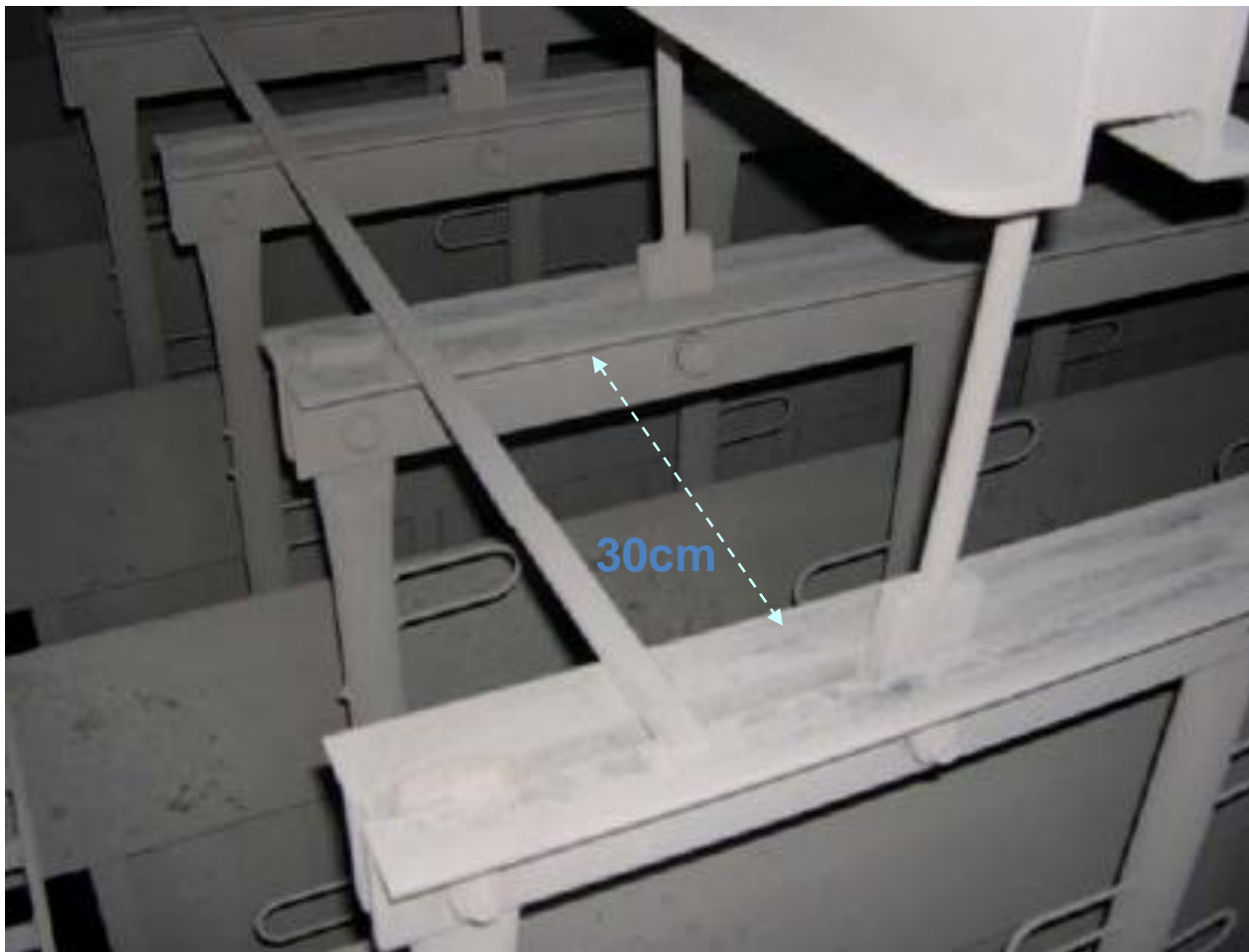
ELEKTRODE: Taložne i Emisione (izgled)

zapremina elektroda: tipično 16000m^3 , rastojanje: $0.3\text{-}0.5\text{m}$, brzina dimnog gasa: 2m/s ;

Efektivni presek jedne grane filtra : $S=70\text{m}^2$



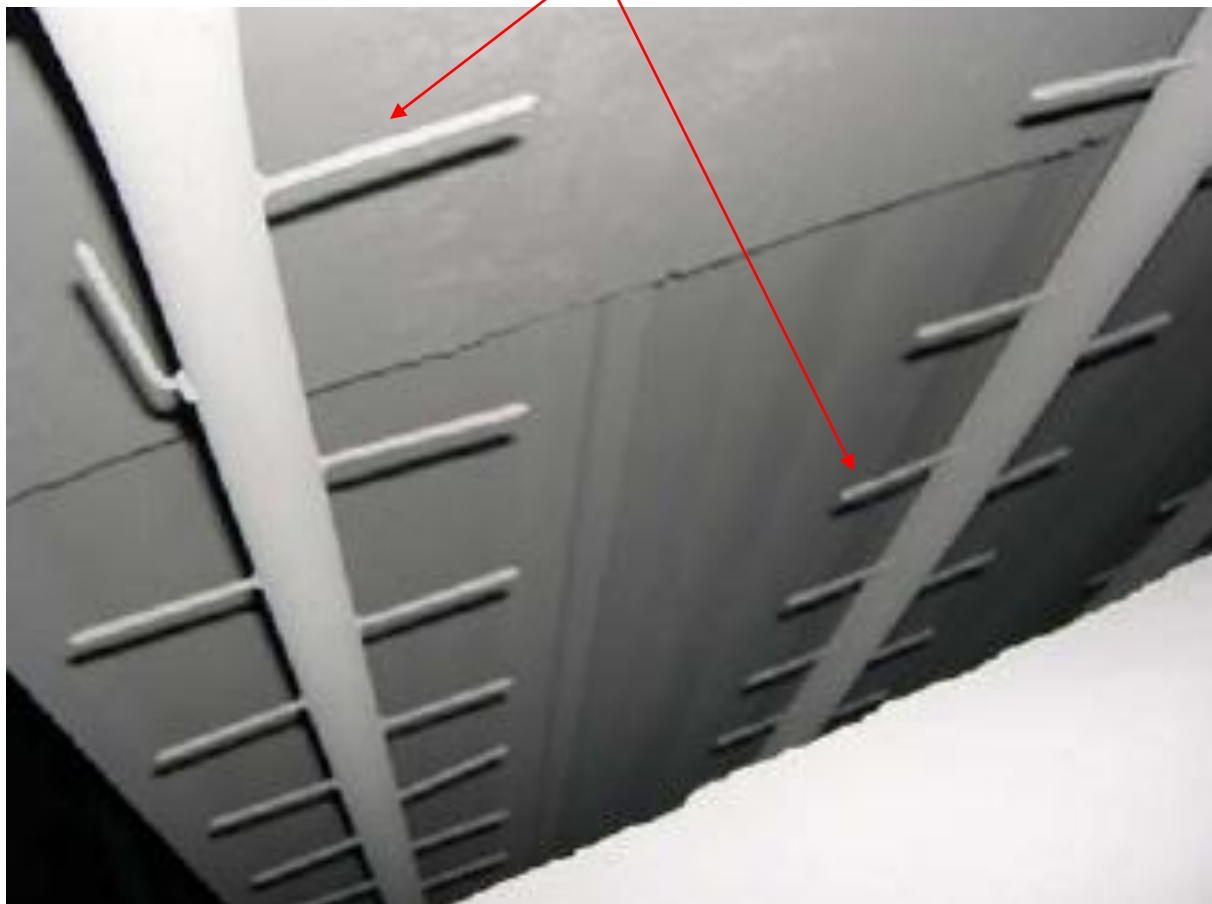
Sistem taložnih elektroda (realni snimak na postrojenju)



Ukupna površina:
20.000-60.000 m²
TIPIČNO: 40.000m²

Rastojanje: 20-40cm
TIPIČNO: 30cm

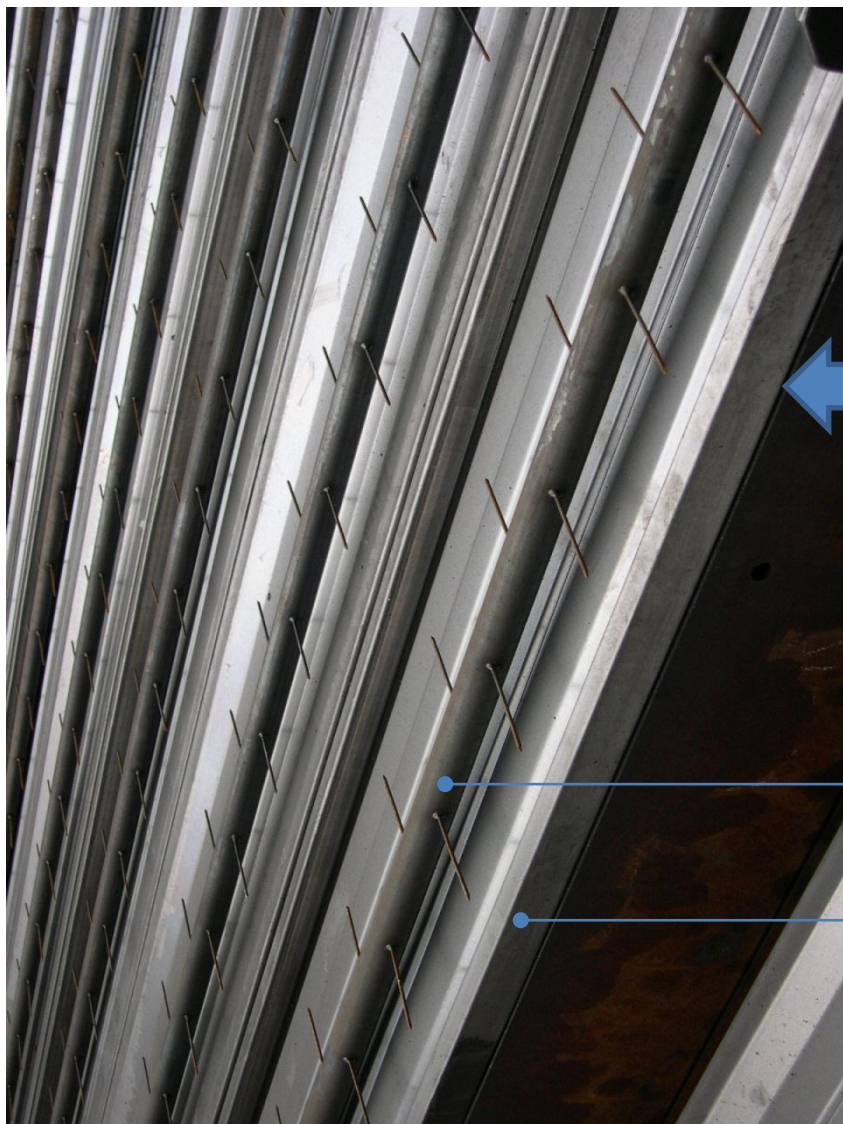
Sistem emisionih elektroda (realni snimak na postrojenju)



-Ovaj sistem odlučujuće
utiče na koronu

-Mali poluprečnik
krivine na ivicama
uvećava polje

Sistem emisionih elektroda (realni snimak na postrojenju) TENT-A



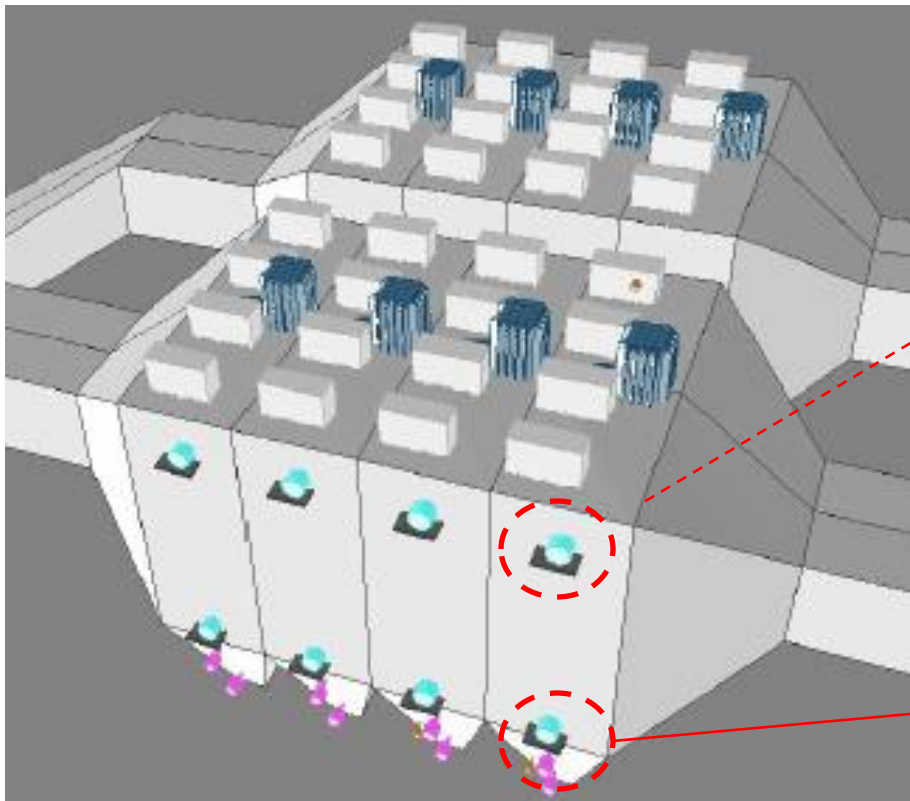
emisione
elektrode

taložne
elektrode

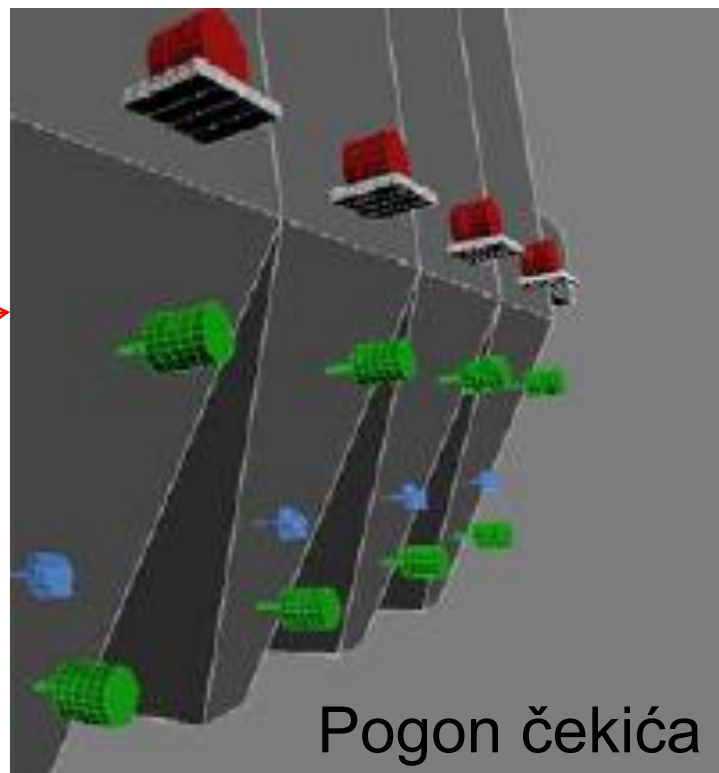
ELEKTRODNI SISTEM
ELEKTROSTATIČKOG
IZDVAJAČA

Taložne i emisione elektrode na TE „Morava“ (pogled sa gornje strane)

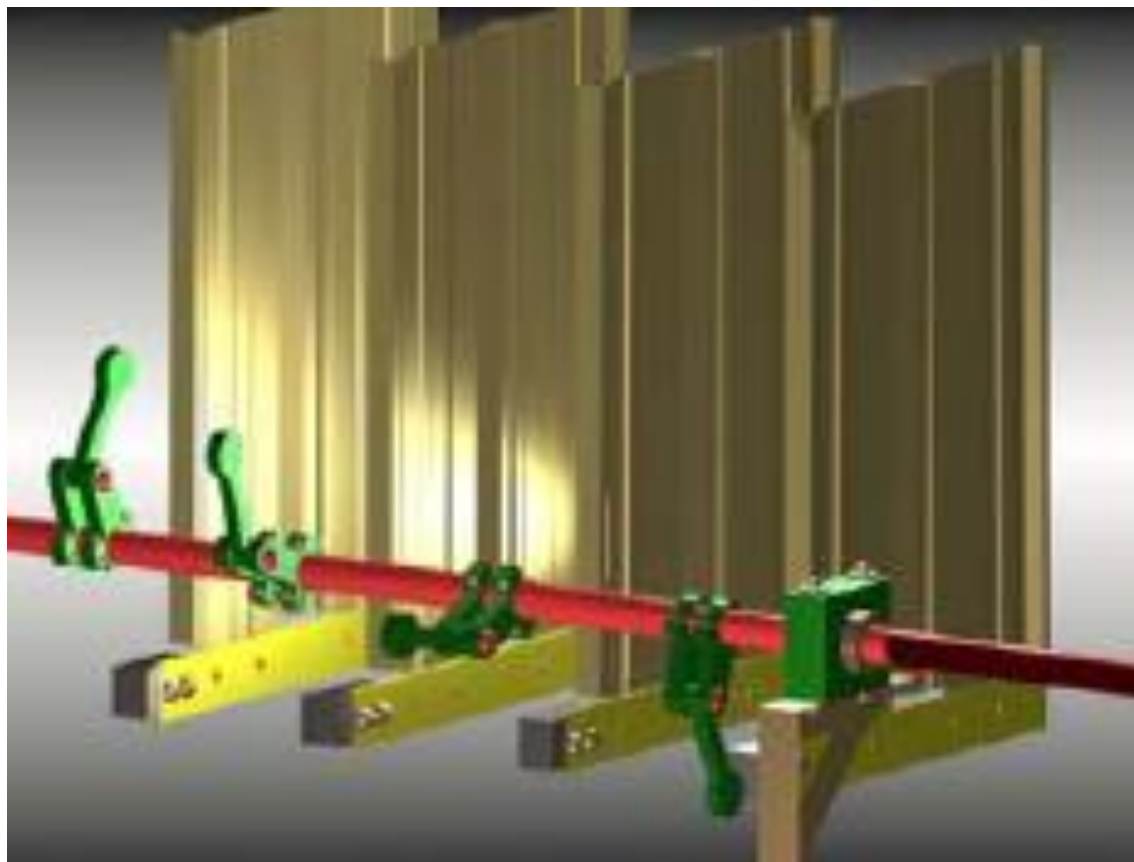




SISTEM POGONA OTRESAČA



UDARNI SISTEM (rotirajući čekići) za OTRESANJE na TALOŽNIM ELEKTRODAMA

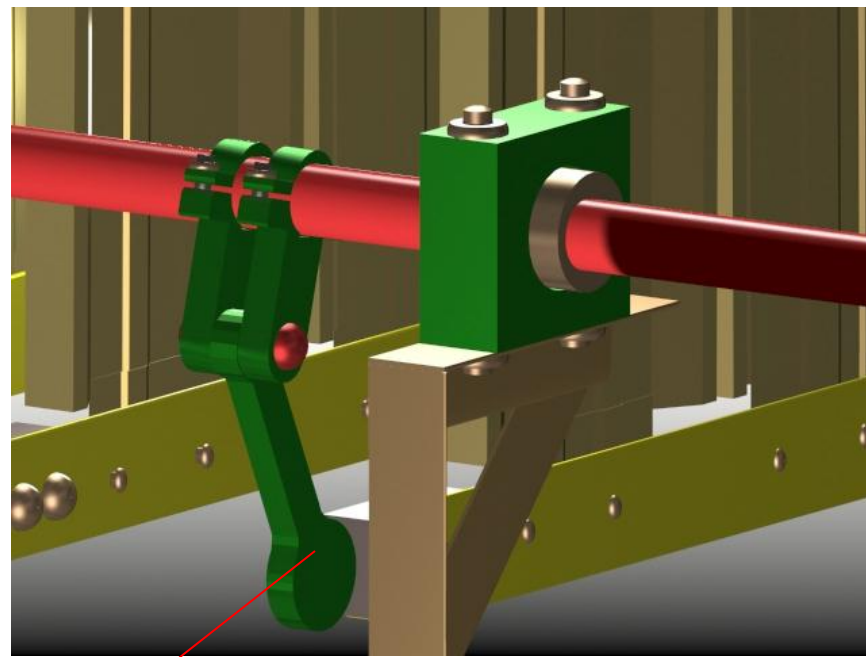
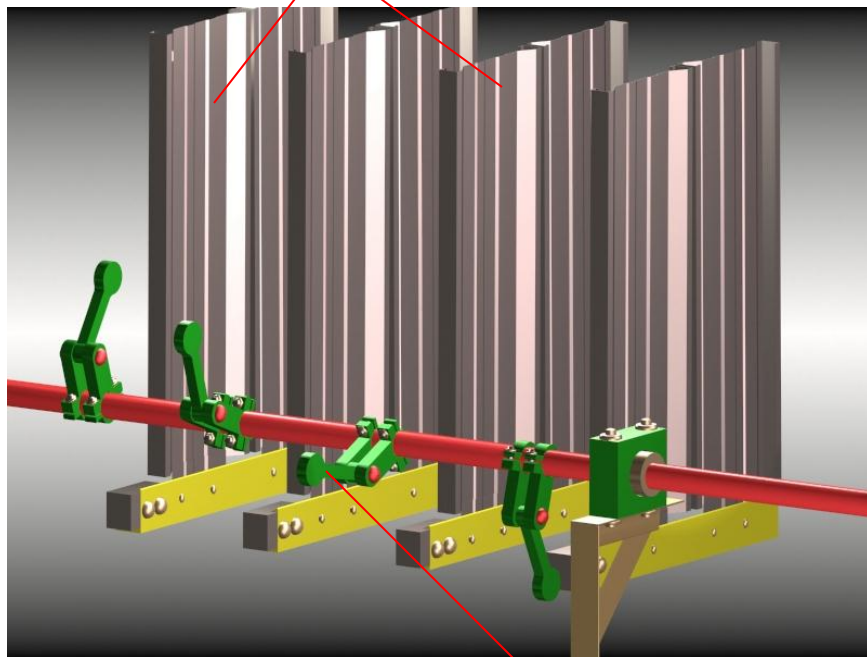


Sistem otresanja je
veoma bitan sa
stanovišta povratne
korone

Ustvari veoma je bitno
USKLAĐIVANJE
sistema elektrostatičkog
izdvajanja i sistema
udarnog otresanja

DETALJ PRIKAZA UDARNIH ČEKIĆA NA SISTEMU za OTRESANJE na TALOŽNIM ELEKTRODAMA

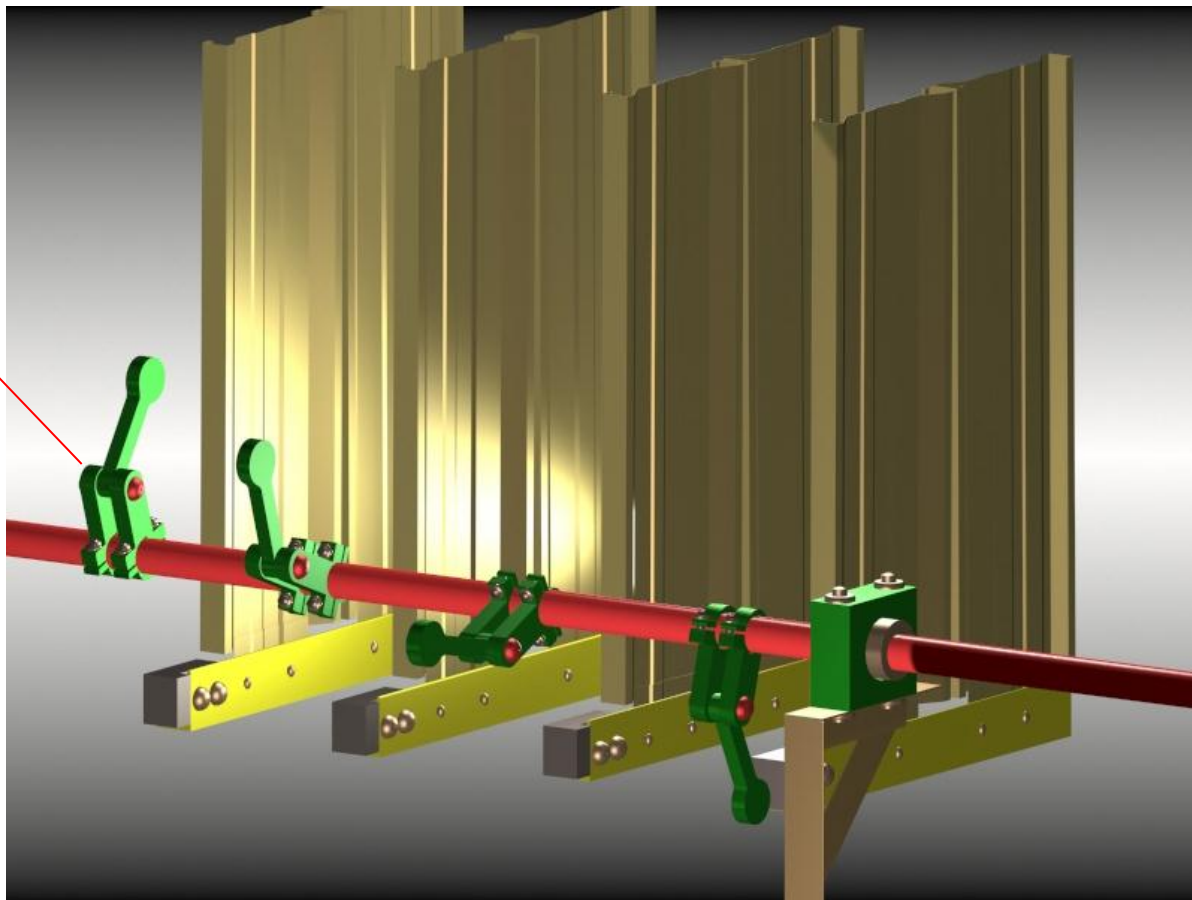
TALOŽNE ELEKTRODE



OTRESAČI TALOŽNIH ELEKTRODA (udarni čekići)

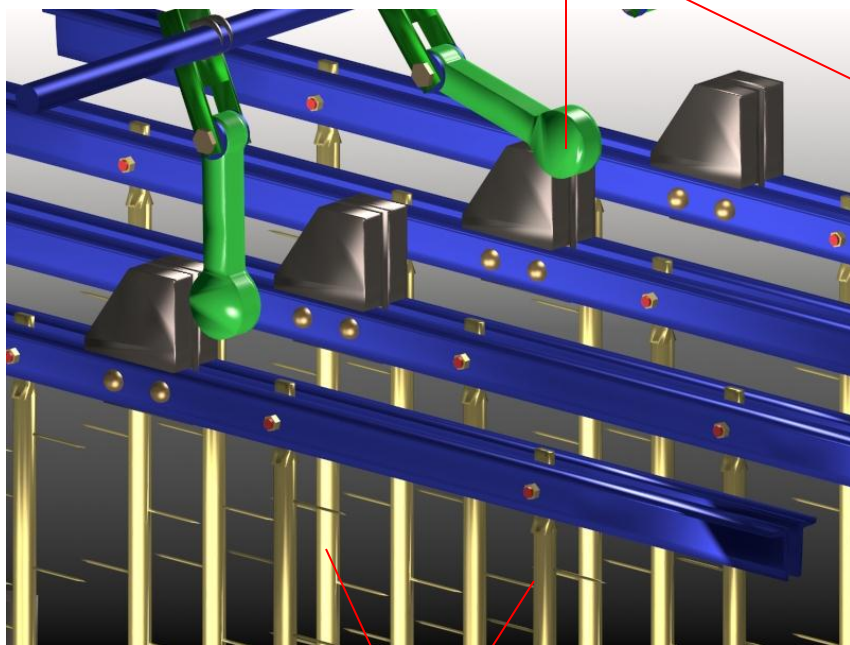
DETALJ PRIKAZA UDARNIH ČEKIČA NA SISTEMU za OTRESANJE na TALOŽNIM ELEKTRODAMA

Čekići otresača

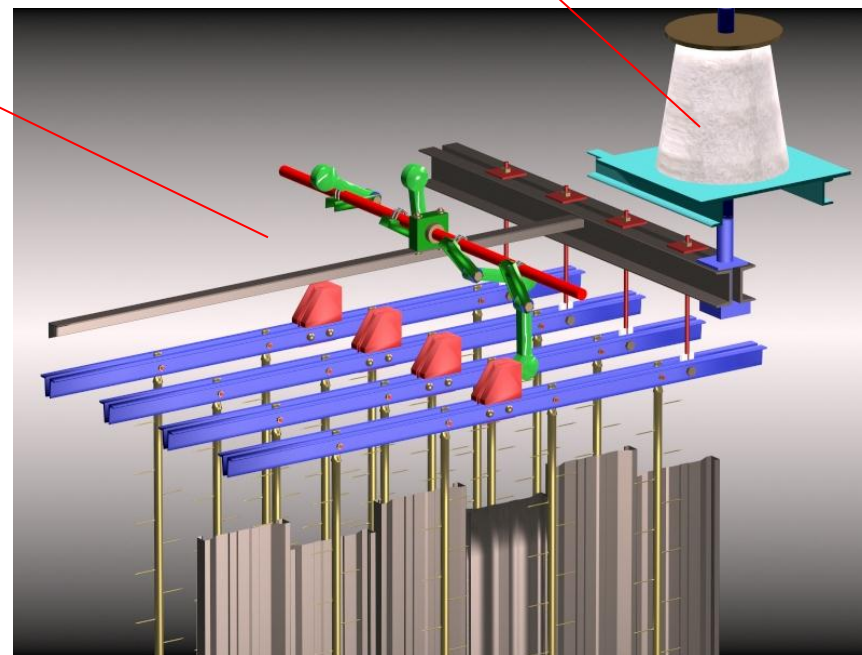


DETALJ PRIKAZA UDARNIH ČEKIČA NA SISTEMU za OTRESANJE na EMISIONIM ELEKTRODAMA

Udarni otresачi emisionih elektroda



Noseći izolator

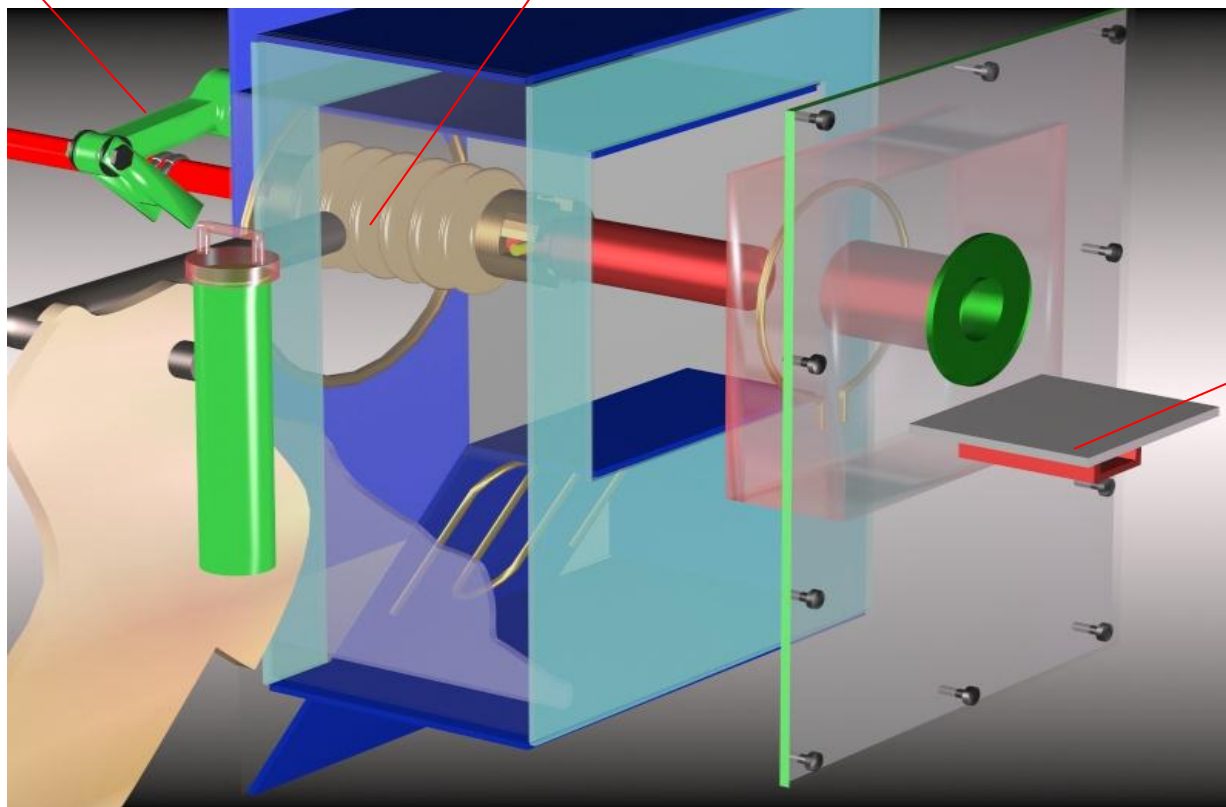


EMISIONE ELEKTRODE

DETALJ PRIKAZA UDARNIH ČEKIĆA NA SISTEMU za OTRESANJE na EMISIONIM ELEKTRODAMA

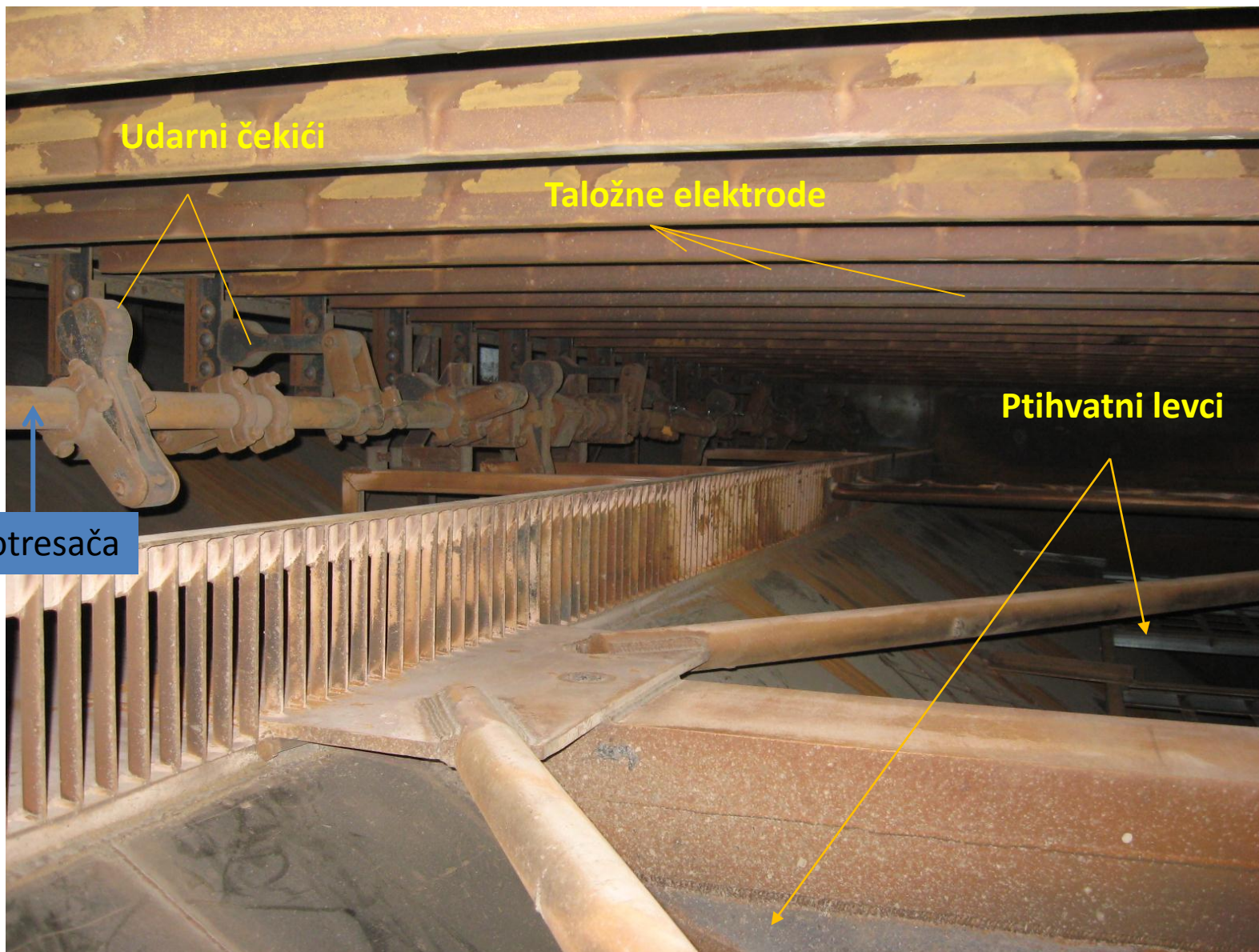
Čekić otresača

Rotacioni izolator

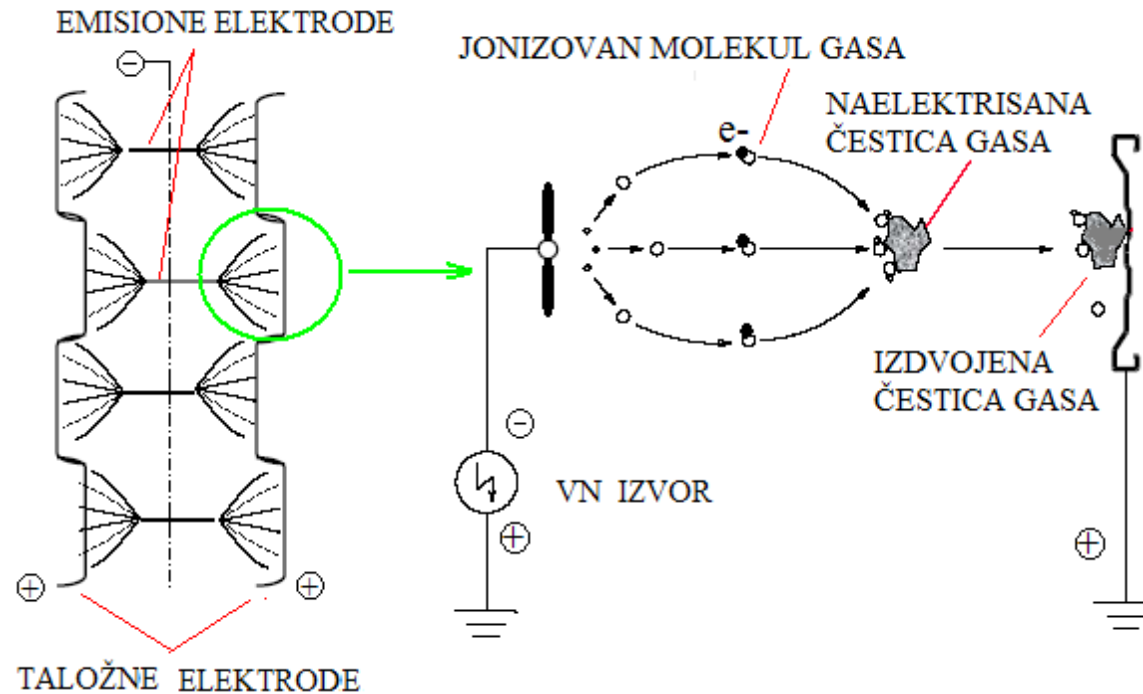


Pogonski
motor

SISTEM OTRESAČA TALOŽNIH ELEKTRODA na TE „Morava“

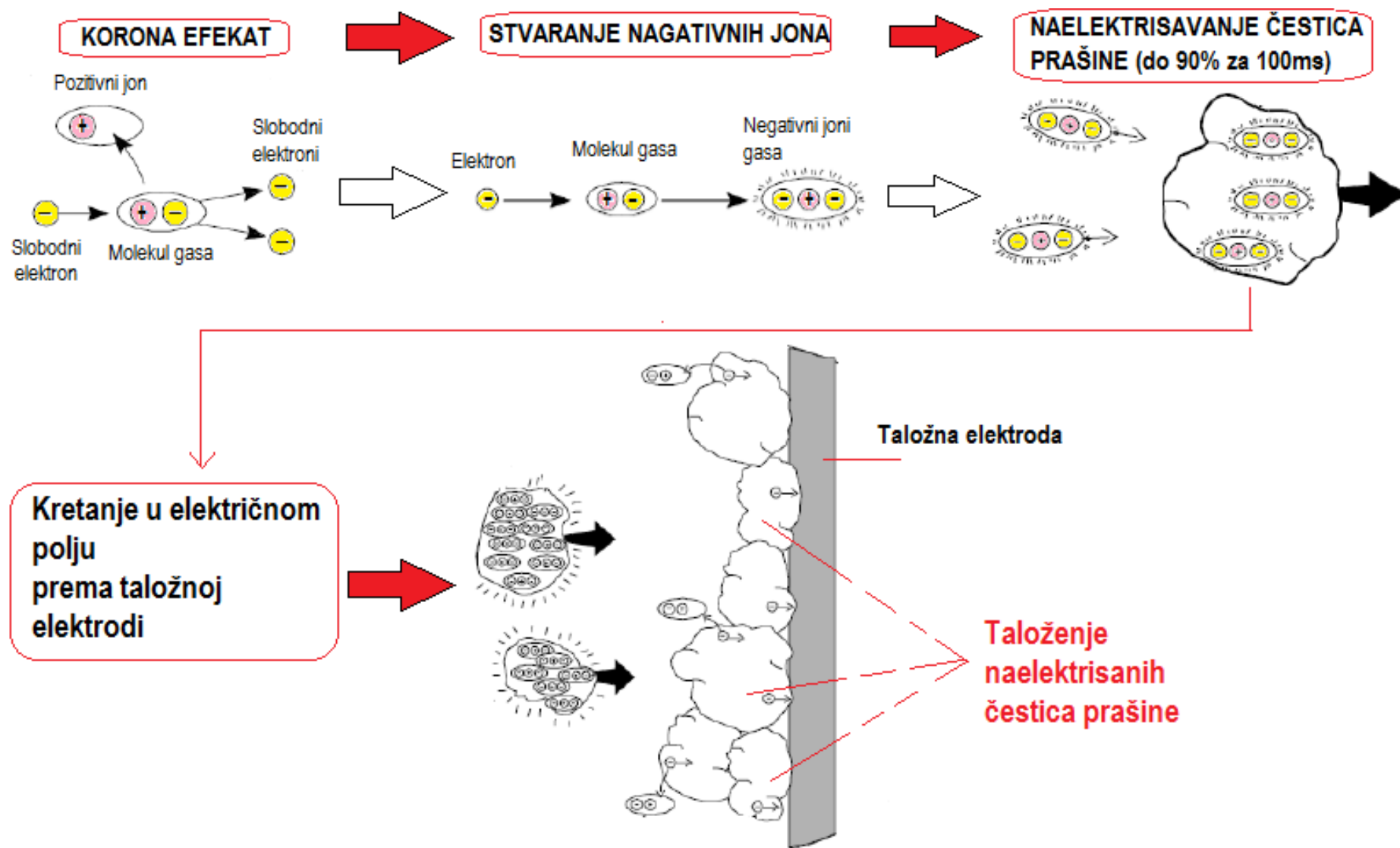


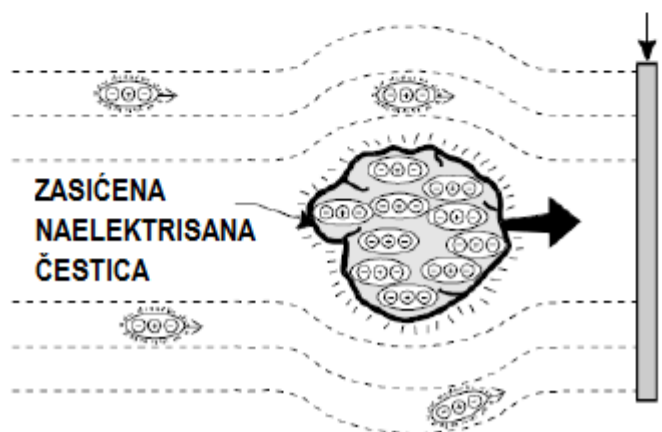
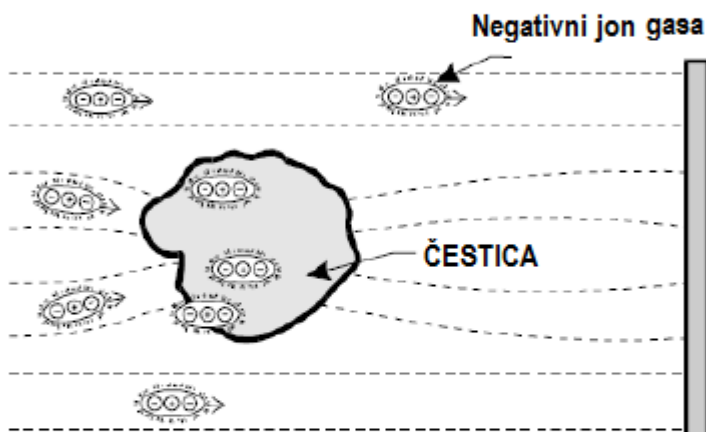
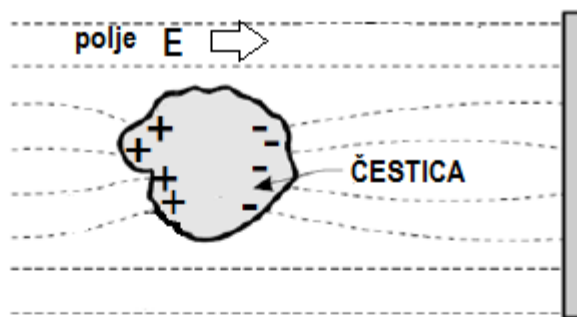
MALO FIZIKE ELEKTROSTATIČKOG IZDVAJAČA!!!



- Elektrostatiki izdvajač sastoji se iz sistema emisionih i taložnih elektroda. Emisione elektrode mogu biti pravougaone žice, štapovi sa šiljcima ili neki drugi oblik koji će sadržati ispupčenja, dok su taložne elektrode ravne.
- Između pomenutih elektroda dovodi se kontrolisani visok jednosmeran napon, dok struja dimnih gasova prolazi između njih.
- Na šiljcima emisione elektrode (ispupčenjima) javlja se korona, vazduh se lokalno jonizuje i stvaraju se joni oba polariteta.
- Pri tom su jedni privučeni od strane taložne elektrode a drugi od strane emisione.
- Joni privučeni od strane taložne elektrode na putu do nje pune čestice letećeg pepela naelektrisanjem.

PROCESI KOJI PRETHODE NAELEKTRISAVANJU ČESTICA PRAŠINE





$$Q_{\max} = Q_{\text{zas}} = k \cdot E \cdot d^2$$

UTICAJ PREČNIKA ČESTICE NA NAELEKTRISAVANJE

Pri prolasku kroz izdvajač, čestice dimnog gasa primaju naelektrisanje od jona. Postoje dva mehanizma naelektrisanja čestica, i to su: (A) naelektrisanje električnim poljem i (B) naelektrisanje difuzijom

Prilikom punjenja električnim poljem čestica prima naelektrisanje po sledećoj formuli:

$$n = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon_r + 2} \right) \left(\frac{Ed^2}{4e} \right) \left(\frac{\pi \cdot eZ_i N_i t}{1 + \pi \cdot eZ_i N_i t} \right) \quad \begin{matrix} t \rightarrow 100\text{ms} \\ \text{ovaj treći} \\ \text{član} \rightarrow 0.9 \end{matrix}$$

n – broj elementarnih naelektrisanja koje čestica primi,
 ε – permitivnost,
 E – električno polje,
 e – elementarno naelektrisanje elektrona,
 d – prečnik čestice,
 Z_i – pokretljivost jona,
 N_i – koncentracija jona,
 t – vreme;

Proizvod prva dva člana predstavlja maksimalno naelektrisanje Q_{\max} koje čestica može prihvatiti ovim mehanizmom, dok treći član opisuje dinamiku punjenja. Iz formule se vidi da je punjenje čestice naelektrisanjem pod efektom polja kvadratno zavisno od prečnika čestice.

Za 100ms naelektrisanje čestica prašine dostigne 90% konačne vrednosti

Difuziono punjenje čestice naelektrisanjem

dato je formulom:

$$n = \frac{dkT}{2e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi \cdot dc_i e^2 N_i}{2kT} t \right)$$

gde su:

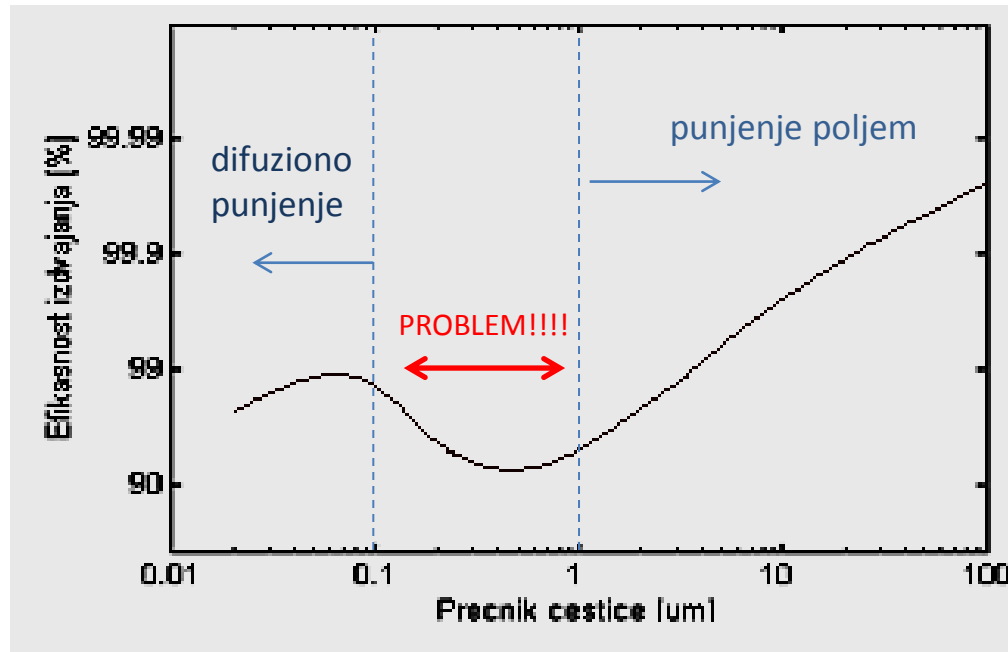
k – bolcmanova konstanta,

T – temperatura,

c_i – srednja termalna brzina jona;

Iz formule se vidi da punjenje čestice raste linearno sa veličinom iste, i da ne postoji zasićenje tj. može se puniti do beskonačnosti, uistinu jako sporo (logaritamska zavisnost).

UTICAJ PREČNIKA ČESTICA NA EFIKASNOST IZDVAJANJA



Efikasnost izdvajanja u funkciji prečnika čestice

Difuziono punjenje je zbog sporijeg (linearnog) rasta naelektrisanja sa veličinom čestice zato dominantno pri malim prečnicima čestica, najčešće ispod 0,1 μm dok je punjenje čestica poljem dominantno za čestice veće od 1 μm. **U oblasti između, oba mehanizma su izražena, pa je efikasnost izdvajanja tih čestica najmanja!!!**

MIGRACIONA BRZINA?

- Elektrostatički izdvajači su danas u širokoj upotrebi u različitim industrijsko-tehnološkim procesima zbog mogućnosti efikasnog izdvajanja čestica kod vrlo visokih gasnih protoka (više stotina metara kubnih u sekundi) uz minimalan pad pritiska u dimnom kanalu.
- Ključ uspešnog rada izdvajača predstavlja njegovo energetska napajanje koje bi moralo da u izdvajaču obezbedi:
 - maksimalno moguće naelektrisanje čestica i
 - uspostavljanje što je moguće jačeg električnog polja neposredno u blizini kolektorskih elektroda.

Prema *White*-u, glavnu teoretsku vezu između efikasnosti izdvajanja i električnog stanja u izdvajaču predstavlja brzina izdvajanja (migraciona brzina). Ona se može predstaviti sledećim izrazom:

$$\omega_k = \frac{K \cdot E \cdot Q}{3\pi\eta d}$$

E - jačina električnog polja,

Q - opterećenje čestica,

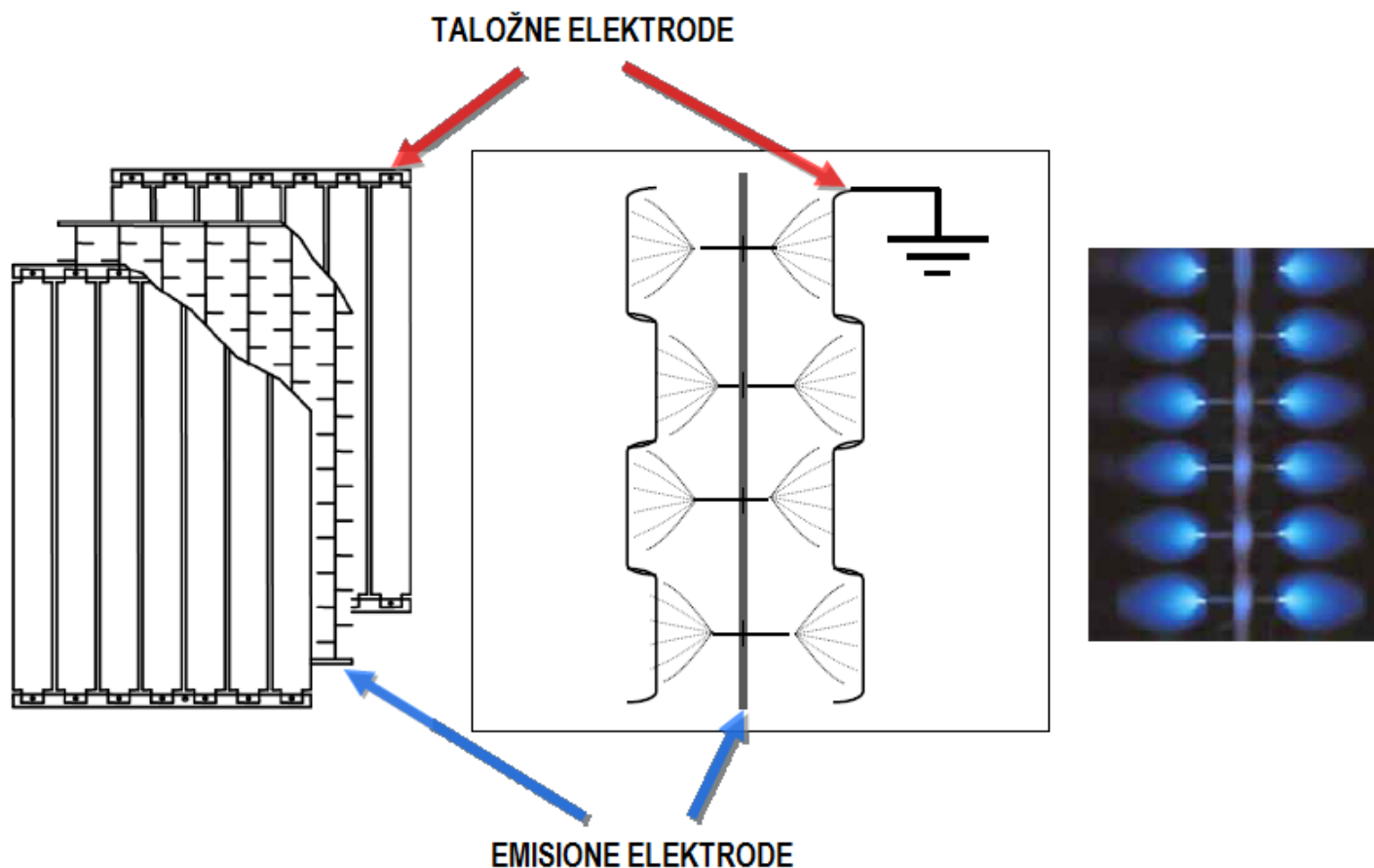
η – viskozitet gasa,

d – prečnik čestica,

K – faktor zavisen od dielektrične konstante,

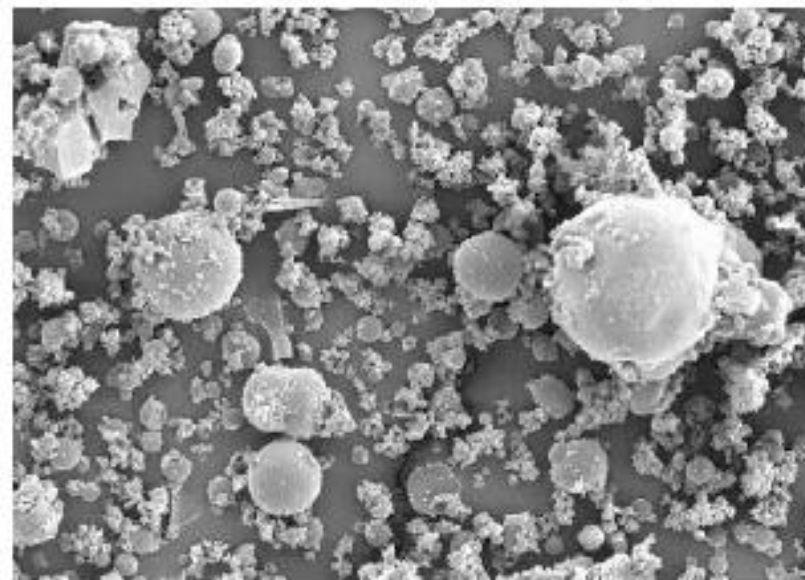
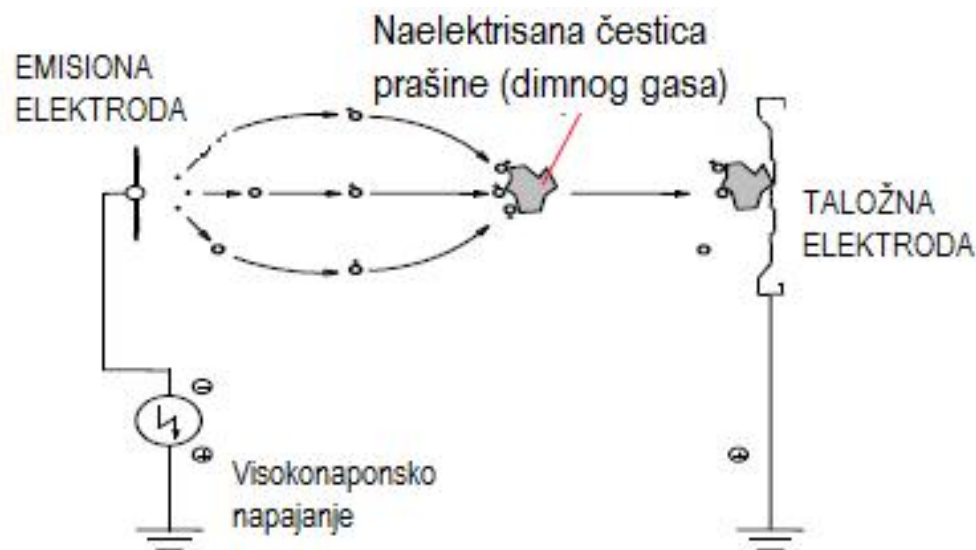
$K=f(\epsilon)$.

NEGATIVNI NAPON NAPAJANJA EMISIONIH ELEKTRODA



Sam proces izdvajanja čestica jako puno zavisi od hemijskog sastava dimnog gasa, čije su karakteristike pre svega, zavisne od uglja - njegove toplotne moći, vlage, sadržaja sumpora, itd. Kod kotlova koji sagorevaju sprášeni ugalj, dimni gas sa česticama letećeg pepela predstavlja osnovni fluid koji se podvrgava fizičkom procesu u prostoru između elektroda izdvajača.

IZDVAJANJE I TALOŽENJE ČESTICA: $0.1\mu\text{m} - 50\mu\text{m}$



Mikroskopski snimak čestica, izdvojenih iz dimnog gasa, na taložnoj elektrodi

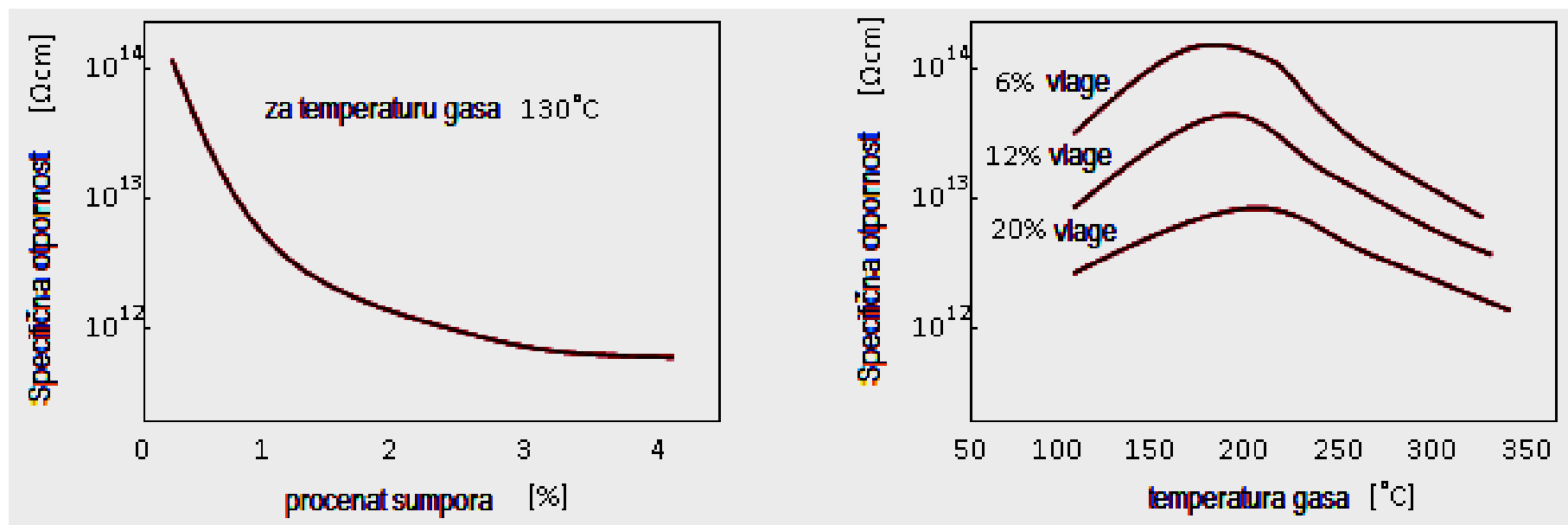
Kakvo će biti izdvajanje, zavisi od karakteristika dimnog gasa kao što su:

- hemijski sastav dimnog gasa,
- hemijski sastav letećeg pepela,
- jonizacione karakteristike dimnog gasa,
- električne karakteristike letećeg pepela (specifični električni otpor, dielektrična konstanta).

- Kako izdavač predstavlja prostor u kome se odigrava jonizacija gasa, pri čemu se uspostavlja struja korone, i to kako kroz međuelektrodni gasni prostor, tako i kroz sloj nataloženog praha na kolektorskoj elektrodi, pretpostavka je da jonizacije karakteristike dimnog gasa, specifična električna otpornost čestica i specifična površina čestica predstavljaju ključne faktore u tehnologiji rada izdavača.
- Iako jako bitne, jonizacije karakteristike dimnog gasa uglavnom nisu nepovoljne za rad izdavača, što se ni u kom slučaju ne može reći za preostala dva faktora (specifični električni otpor i dielektrična konstanta)
- Većina studija je pokazala da je specifična električna otpornost čestica veoma bitan faktor
- U nastavku malo više o tome

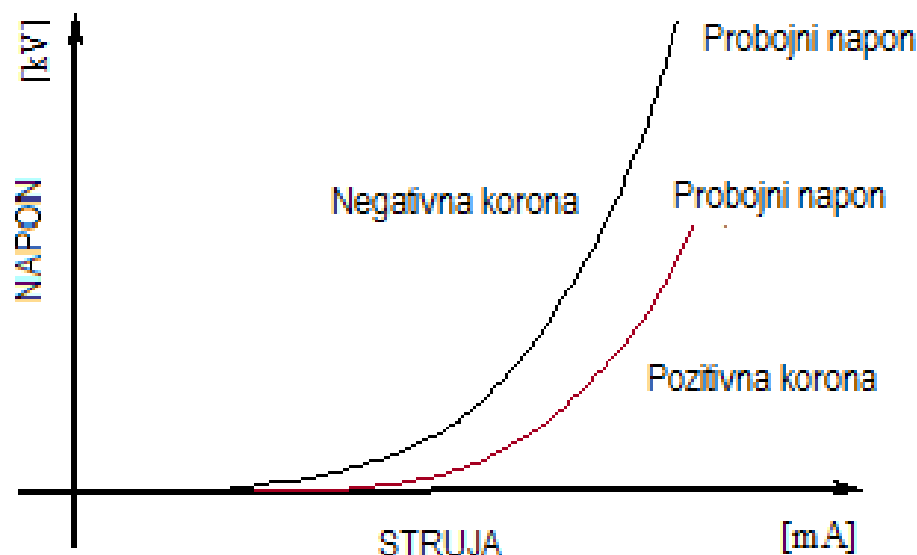
SPECIFIČNI ELEKTRIČNI OTPOR-uticaj na izdvajanje

- Specifični električni otpor je veoma teško predvidljiv parametar. Primarno zavisi od hemijskog sastava pepela, temperature dimnog gasa, sadržaja H_2O i SO_3 u dimnom gasu, veličine i oblika čestica, primenjenog električnog polja i dr.
- Ukoliko ovaj otpor prelazi granicu od $10^{10} \Omega\text{cm}$, počinju se javljati poteškoće u radu izdvajača, kao što je povratna korona.
- Na sledećoj slici je predstavljena zavisnost specifičnog električnog otpora u zavisnosti od procenta sumpora i od temperature:



Zavisnost specifičnog električnog otpora letećeg pepela od temperature i sadržaja sumpora

POZITIVNA I NEGATIVNA KORONA?

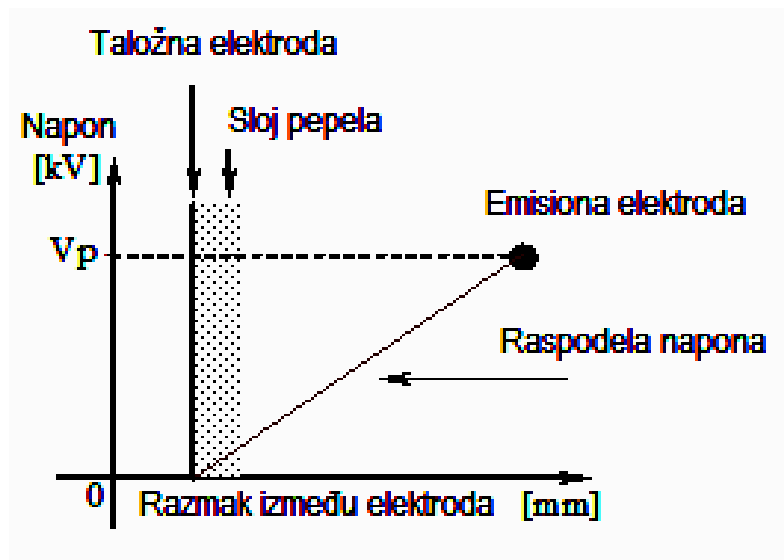


Krive napon-struja za negativnu i pozitivnu koronu

- Elektrostatički izvajач može raditi i sa pozitivnom i sa negativnom koronom.
- Ove dve korone se veoma razlikuju po svojstvima i mehanizmima nastanka.
- Pozitivna korona ima niži napon proboja i samim tim slabije čisti vazduh od čestica, dok negativna proizvodi više ozona koji je opasan po zdravlje – stupa u reakciju sa svakom organskom materijom, kao slobodni radikali.
- Iz tih razloga pozitivna korona se koristi u kućnim uređajima za prečišćavanje vazduha dok se negativna koristi u industriji
- Treba još pomenuti da u određenim gasovima (vodonik npr.) nije moguće ostvariti negativnu koronu jer molekuli tih gasova ne stvaraju negativne jone.

POVRATNA KORONA?

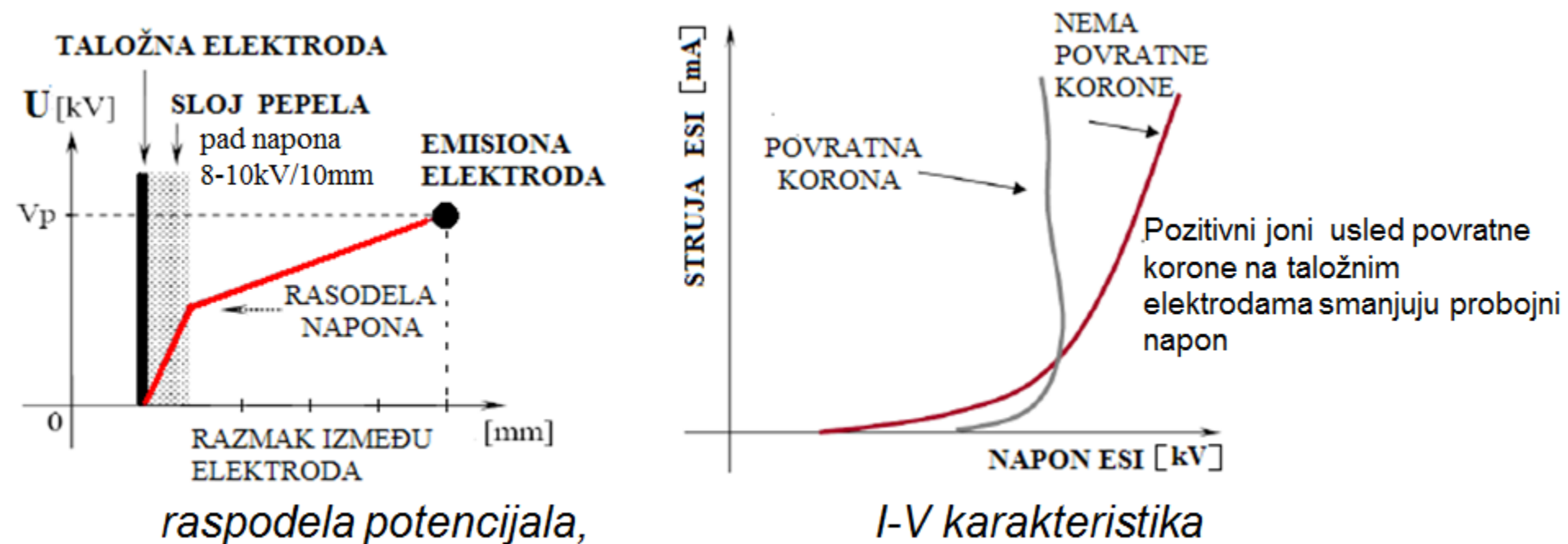
Ova pojava se, uglavnom, sreće kod postrojenja koje sagorevaja sprašeni ugalj sa niskim sadržajem sumpora, zbog pojave pepela visoke specifične električne otpornosti.



Raspodela napona između elektroda kod normalno otpornog pepela

- Kako se čestice talože na kolektorskoj elektrodi, sloj nataloženog praha postaje sve deblji, i u nekoj tački će pad napona preko ovog sloja dostići takvu vrednost da dolazi do dielektričnih proboja unutar sloja praha. Ta pojava se naziva *povratna korona*.
- Povratna korona je suprotne polarnosti od primarne (željene) korone, i kao rezultat toga dolazi do uspostavljanja jako lošeg elektrostatičkog ambijenta (nehomogenog elektrostatičkog polja), koji dalje dovodi do pojave povratne jonizacije i znatnog sniženja efikasnosti izdvajanja.

Efekat povratne korone u taložnoj komori-uticaj slabo provodnog pepela



Usled dugotrajnog izdvajanja čestica dimnog gasa na taložnim elektrodama se formira sloj pepela, koji kada dostigne odgovarajuću debljinu, nepovoljno utiče na dalje izdvajanje. Raspodela potencijala je izrazito nelinearna a kao posledica toga dolazi do izobličenja I-V krive elektrostatičkog izdvajaača. Ključni efekat je **povratna korona**, koja postaje dominantna pogotovu kada se radi o slabo ili srednje provodnom pepelu (specifična provodnost oko $10^{12}\Omega m$). **Pozitivni joni koji pri ovome nastaju smanjuju probojni napon (slika gore desno)!!!**

Negativni efekti povratne korone

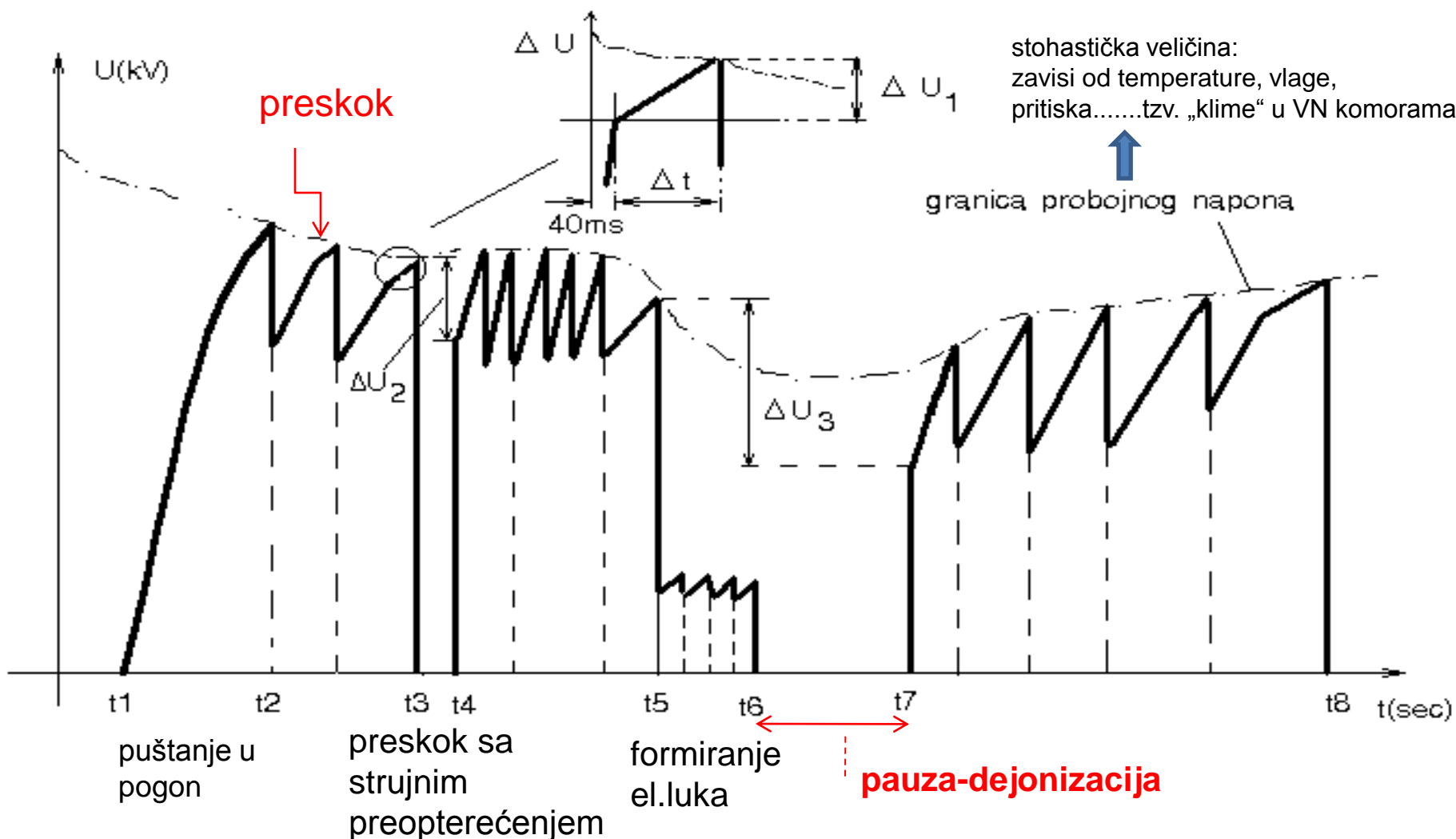
- Na taložnoj elektrodi kod pepela srednje provodnosti (oko $10^{12}\Omega\text{m}$) stvaraju se udubljenja (tzv. krateri) sa lokalnim žarenjem pepela, jonizacijom i izbacivanje materijala u među elektrodni prostor.
- Pozitivni joni na taložnim elektrodama smanjuju probojni napon.
- Posledica ovoga je smanjenje brzine migracije čestica.
- U izlaznoj sekciji brzina migracije može biti redukovana sa 20cm/s na svega 2-3cm/s.
- Kao posledica ovih efekata je i značajno smanjenje izdvajanja čestica
- Povratna korona na emisionim elektrodama smanjuje efekat korisne korone i jonizaciju.
- To umanjeње može biti i do 40%.

Kako redukovati uticaj povratne korone?

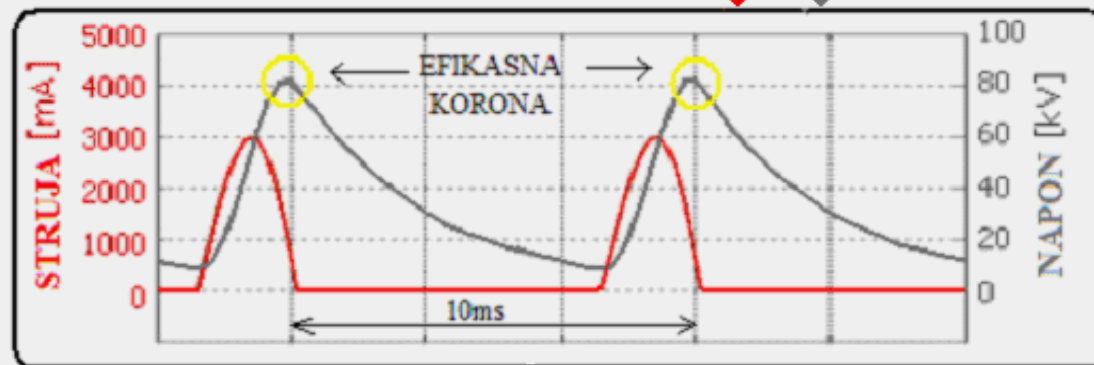
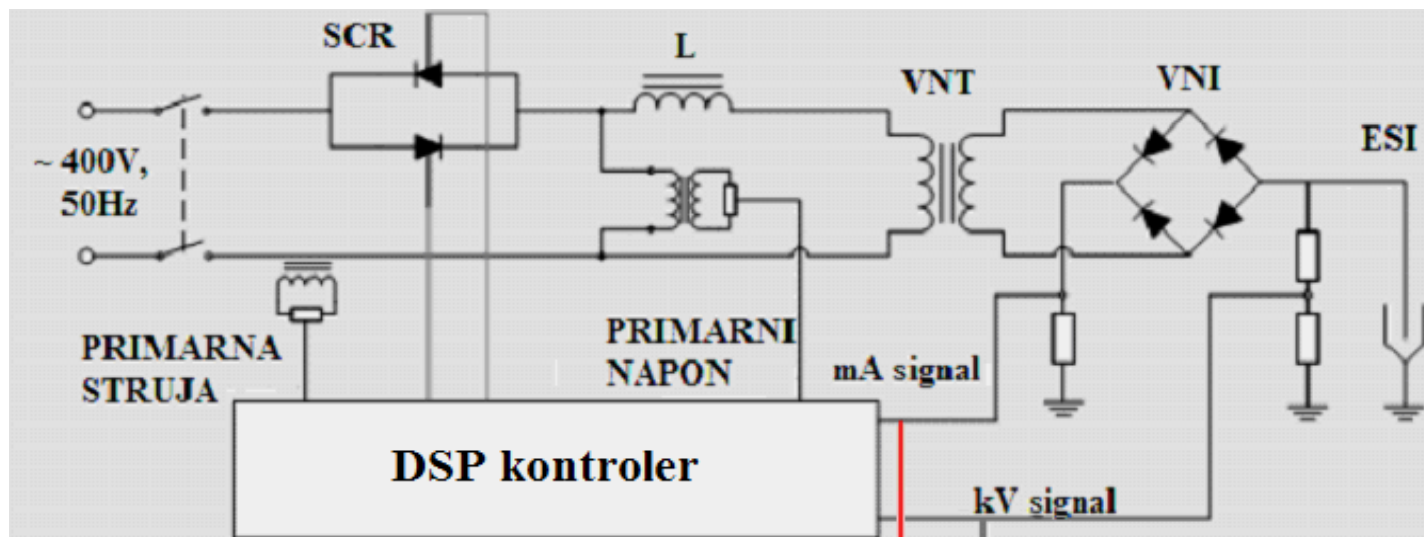
- Većina ovih problema kao i povećanje efekata elektrostatičkog izdvajanja se mogu rešiti uvećanjem ukupne površine elektroda i zapremine izdvajača.
- Međutim ovo rešenje je ekonomski veoma nepovoljno (čelični elektrodni sistem je jako skup).
- Prilagođenjem napajanja proces izdvajanja se može optimizovati, a brzina migracije povećati.
- Primena adekvatnog napajanja omogućava uvećanje ostvarive srednje vrednosti napona, povećanje srednje vrednosti struje, smanjenje potrebne površine i težine elektroda, smanjenje energije luka i značajno skraćivanje intervala dejonizacije (tzv. intervala „beznaponske pauze“).
- Povratna korona se značajno može redukovati korišćenjem intermitentnog napajanja sa dovoljnim trajanjem intervala isključenosti- tzv. *vreme dejonizacije*, u toku kojih se pozitivni joni mogu relativno brzo rekombinovati.
- Inteligentnom intermitentnim režimom kao i metodom rane detekcije povratne korone, migraciona brzina se može značajno uvećati (tipično sa 4-5cm/s na 10-15cm/s).

Karakteristična vremenska promena napona ESI tokom jednog ciklusa izdvajanja

Ovaj složeni oblik napona mora da obezbedi VN izvor napajanja sa pripadajućom upravljačkom logikom!!!



Topologija tiristorskog 50Hz-nog napajanja ESI



Kod ovog tipa napajanja efikasna korona je prisutna pri vršnim vrednostima napona, odnosno svega 1-2ms na svakih 10ms

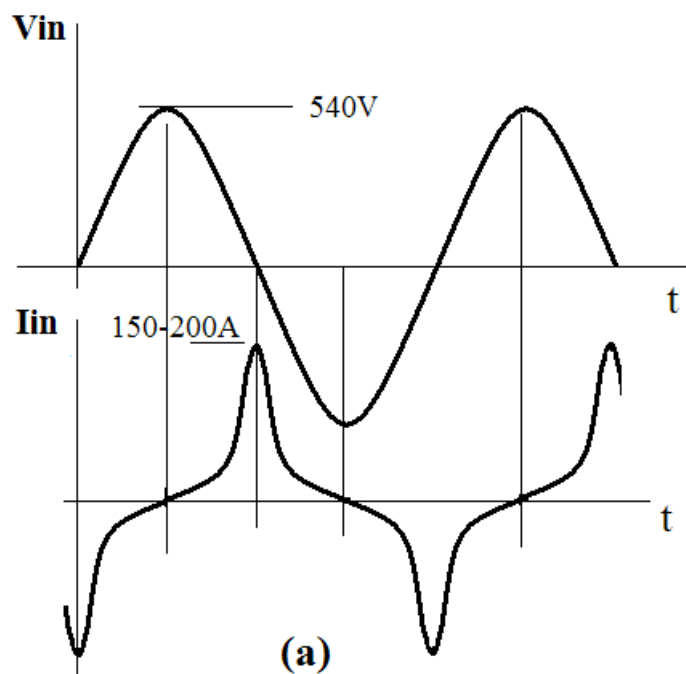
Dugi intervali dejonizacije nakon varničenja smanjuju efikasnost izdvajanja. Pored ovoga, kod uspostavljanja luka struja se ne može prekinuti tokom jedne mrežne poluperiode, do komutacije tiristora. Energija luka dobija se iz izvora zahvaljujući primarnoj struji koja postoji sve do komutacije tiristora. Tipična energija luka je 150-200J.

PROBLEMI KOD 50Hz-nog NAPAJANJA

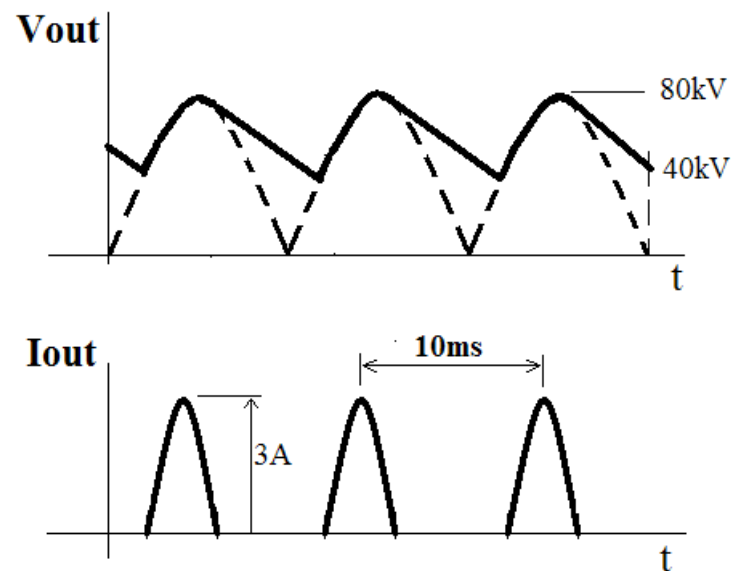
- Kod uspostavljanja luka struja se ne može prekinuti tokom jedne mrežne poluperiode, do komutacije tiristora
- Ograničenje u korišćenju efikasne korone
- Velika energija luka degradira kako taložne tako i emisione elektrode
- Loš faktor oblika linijske struje
- Velika reaktivna, te stoga i prividna snaga
- Mali stepen korisnog dejstva

Problemi koji smanjuju energetska efikasnost tiristorskih napojnih jedinica ESI

Problemi ulazne snage koju napojna jedinica uzima iz mreže 0.4kV. Konvencionalno dvofazno 50Hz-*no* napajanje se odlikuje lošim faktorom oblika linijske struje, velikom reaktivnom, te stoga i prividnom snagom, kao i malim stepenom korisnog dejstva.

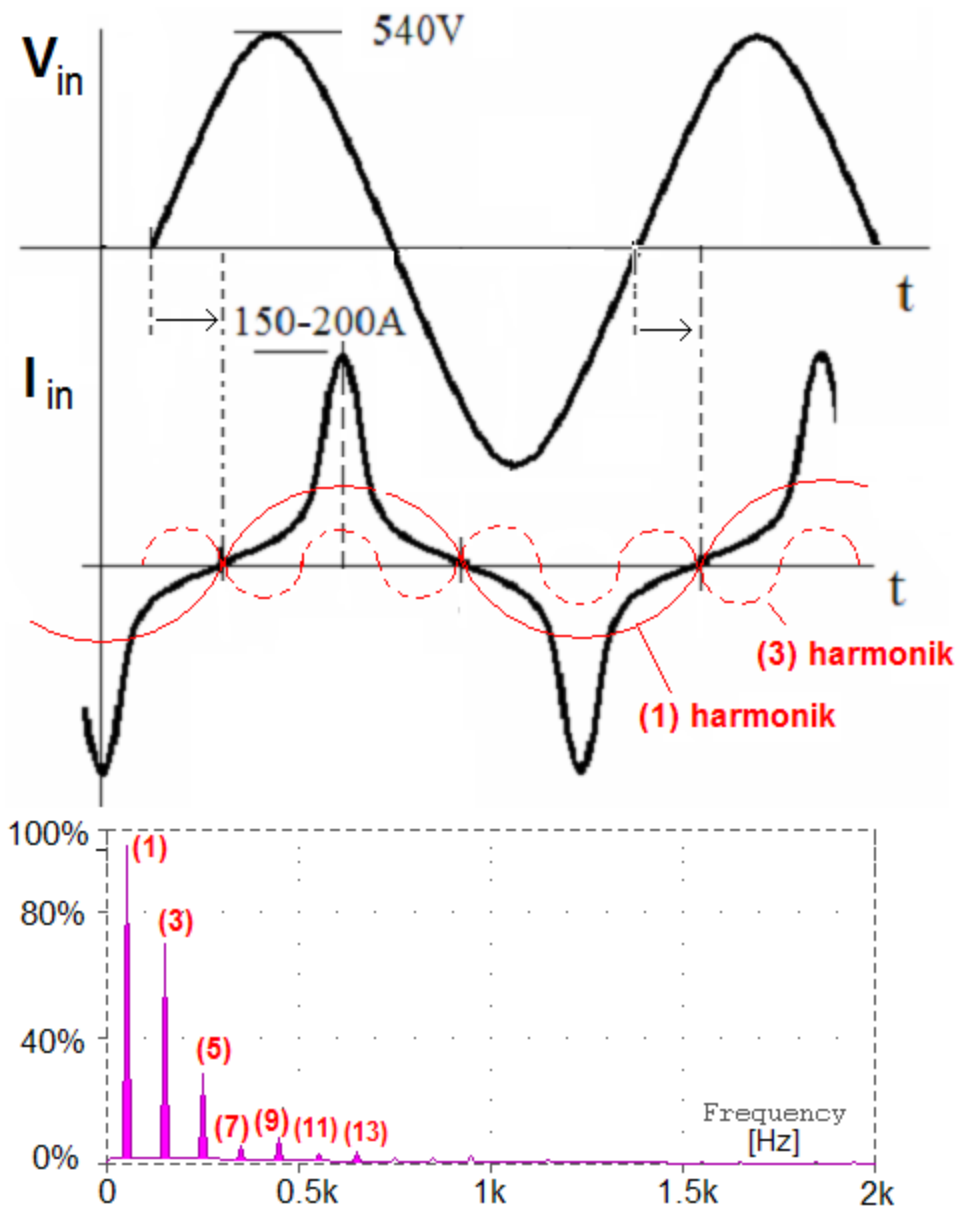


Ulazni mrežni napon i struja



(b)

Izlazni mrežni napon i struja



- Struja koja se uzima iz mreže je složenoperiodična veličina sa relativno visokim učešćem harmonika niskih učestanosti.

- Osim toga osnovni harmonik struje je fazno pomeren u odnosu na mrežni napon.

- Ove osobine su nepoželjne zato što se energija prenosi samo aktivnom komponentom osnovnog harmonika, a to je komponenta koja je u fazi sa naponom.

- Sve komponente struje, osim aktivne, dovode do nepotrebnog povećanja efektivne vrednosti struje koja se uzima iz mreže.

- Postojanje struja viših harmonika dovodi do izobličenja mrežnog napona, naročito na SN 6kV strani što može predstavljati smetnju u radu ostalih potrošača priključenih na iste sabirnice.

Faktor snage osnovnog harmonika kod ovih sistema jako loš, odnosno $\cos\varphi < 0.65$!!!

Ukupni faktor snage, koji obuhvata uticaj i viših harmonika, $\lambda = P/S < 0.5$!!!



Deo ESI postrojenja
na TENT-A4/
Elektrodni sistem

TENT-A4



Tiristorski (SCR)
blok
sa zaštitnim
elementima i
sistemom
za hlađenje



Gavni Razvodni Orman (GRO)

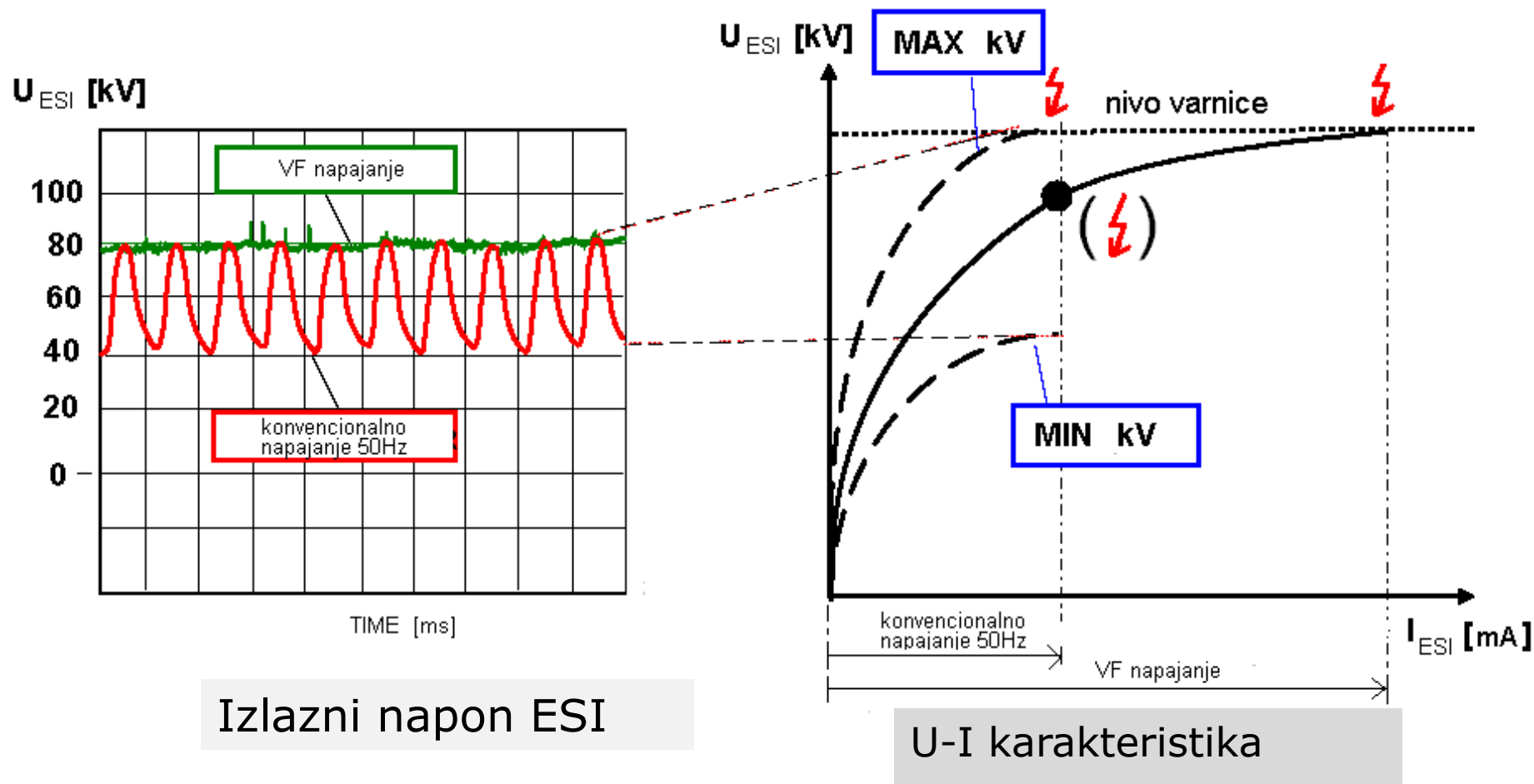


Izgled GRO i DSP kontrolera

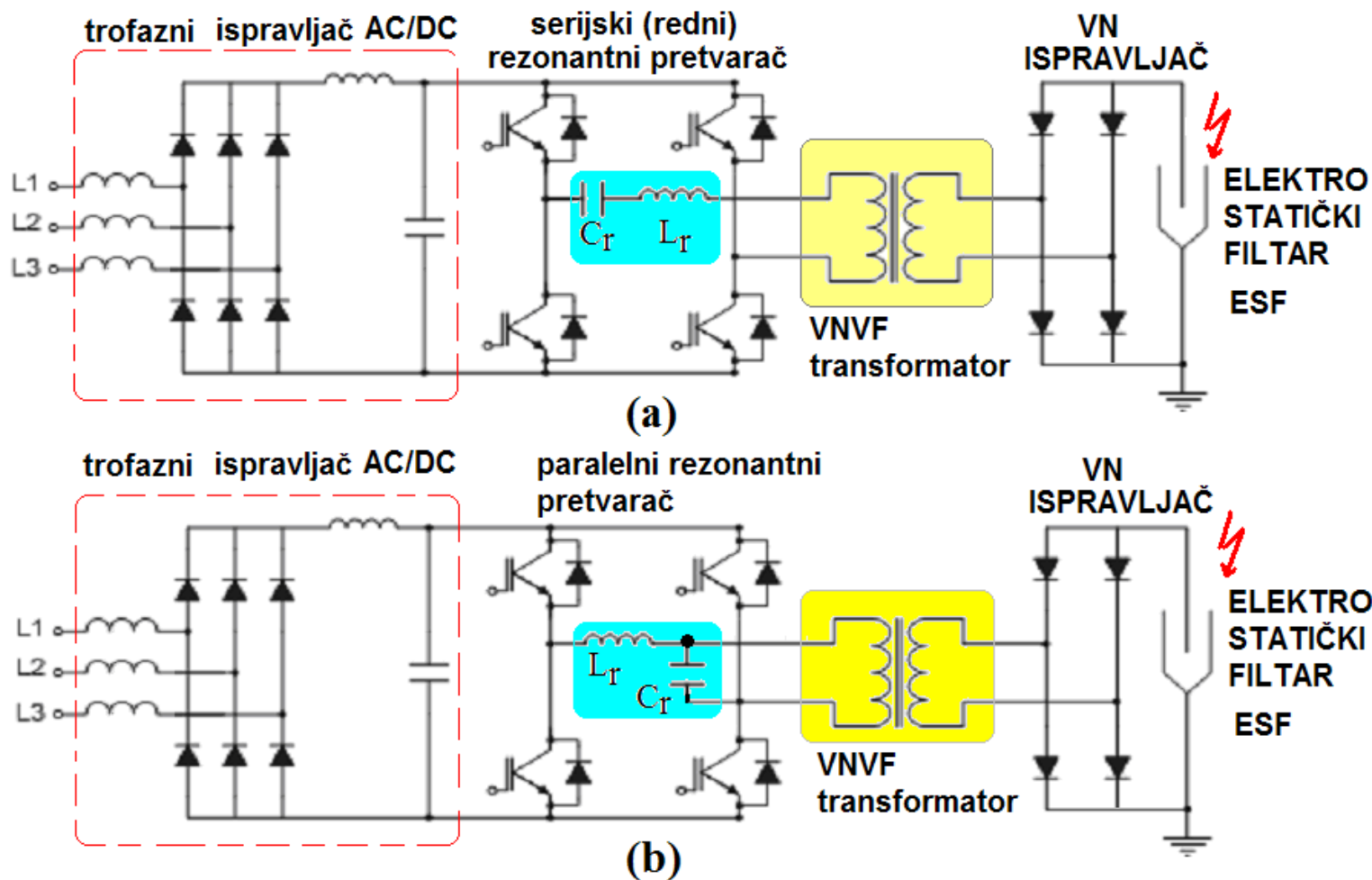
VF PREKIDAČKA NAPAJANJA

- Radi se o visokofrekventnim (VF) napajanjima
- Ona su postepeno uvedena u sisteme napajanja ESI, prihvatljive su cene i postaju veoma konkurentna u odnosu na setove *transformator/ispravljač* (T/I) i tiristorsku kontrolu (50Hz sisteme).
- VF prekidački izvori **obezbeđuju dramatično različite performanse i fizičke karakteristike ESI** od tiristorskih izvora napajanja
- Primljeni u ovim aplikacijama novi VF prekidački pretvarači imaju značajan uticaj na izdvajačke sisteme i to sa aspekata konstrukcije, rada i održavanja

POREĐENJE IZLAZNOG NAPONA VF I KONVENCIONALNOG NAPAJANJA

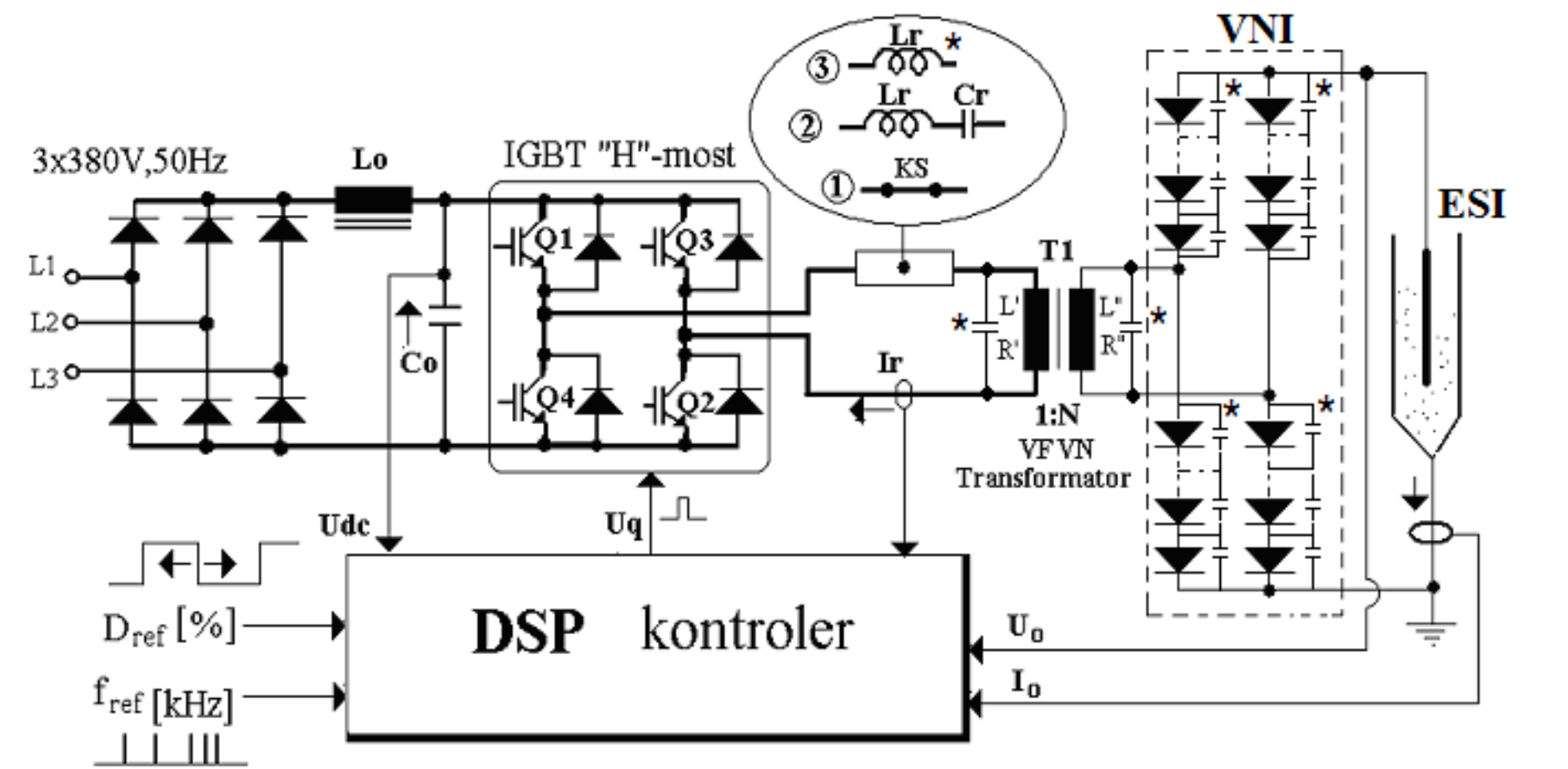


VISOKOFREKVENTNO NAPAJANJE ESI



Rezonantni VNVF energetske pretvarači za napajanje ESI; (a) sa serijskim rezonantnim kolom, (b) sa paralelnim rezonantnim kolom.

Multirezonantno VNVF napajanje bazirano na IGBT tehnologiji



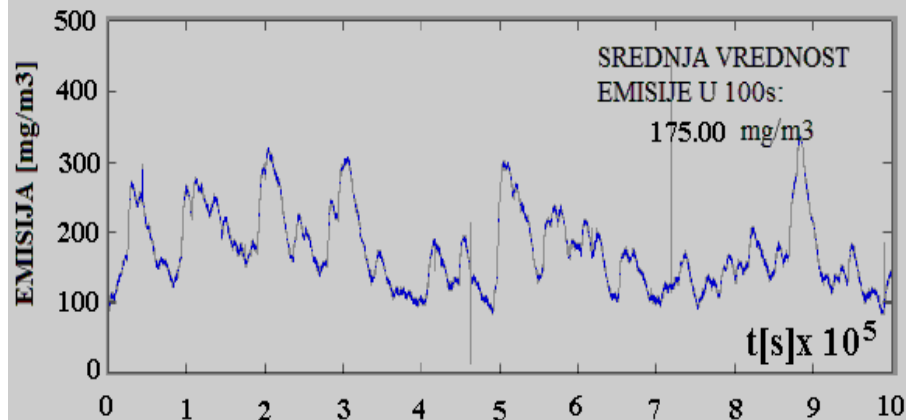
(1)- rad u tzv."hard switching" režimu (2)-Rezonantna topologija (NWL), (3) Multirezonatna topologija

POBOLJŠANJA KOJE NUDI VF NAPAJANJE

- Mnogo **precizniju kontrolu radnih parametara** ESI (kao što su napon i struja), od konvencionalnog 50Hz-nog
- **Znatno brži porast napona** ESI i *znatno brži* odziv na promene opterećenja u odnosu na konvencionalno 50Hz-nog
- Visoka učestanost obezbeđuje **značajno smanjenje veličine i težine** VN transformatora
- Kompaktniji dizajn uz **minimiziranje cene** ugradnje i održavanja.
- Visoka učestanost takođe obezbeđuje mnogo veću reaktansu transformatorskog jezgra i shodno tome **bolju efikasnost izvora napajanja**
- Naročita prednost VF napajanja ESI se odnosi na **sposobnost modulacije** izlaznog napona
- **Uštede na elektrodnom sistemu do 30%** (manje dimenzije i manja količina čelika)

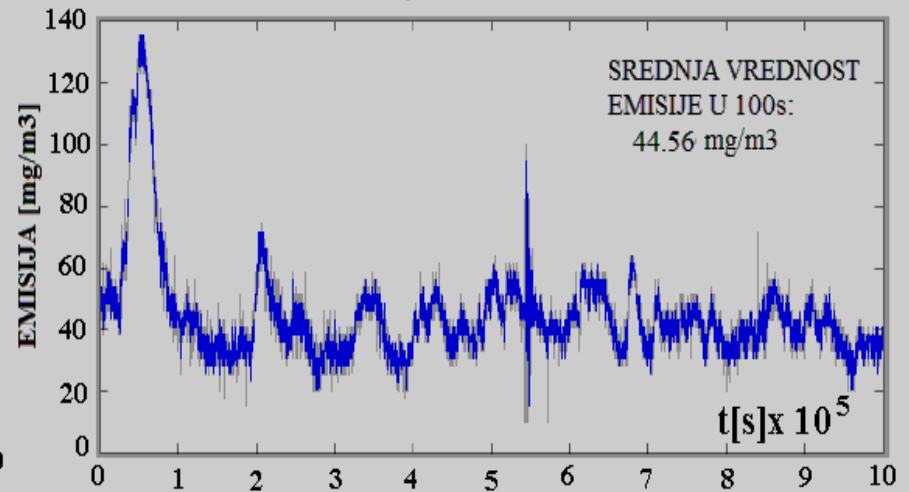
Merenje emisija i poređenje 50Hz-nih VF sistema

MERENJE EMISIJE -ukljucena dva 50Hz sistema



(a)

MERENJE EMISIJE -ukljucena dva VF sistema



(b)

Izmerene vrednosti koncentracije na TE "Morava"

(a) 50Hz-ni sistem , (b) VF sistem

UMESTO ZAKLJUČKA: DALJI PRAVCI ISTRAŽIVANJA U OBLASTI NAPAJANJA I PROBLEMATICI RADA ELEKTROSTATIČKIH IZDVAJAČA

1. Optimizacija napojnih jedinica u cilju poboljšanja ulaznog faktora snage, energetske efikasnosti i postizanje većih izlaznih napona (upotreba multilevel pretvarača i DSP upravljanje)
2. Rana detekcija korone i DSP spektralna analiza struja i napona ESI
3. Optimizacija procesa otresanja i uvećanje efiksanosti evakuacije pepela iz prihvatnih levkova
4. Povećanje efikasnosti izdvajanja, sprečavanje povratne korone, detekcija debljine sloja nataloženog pepela (merenje struja LEM strujnim senzorima, po elektrodama sekcije ili po grupama elektroda
5. Usklađivanje otresanja i izdvajanja, i postizanje zahtevanog izlaznog čišćenja ; istraživanja „mirnog “ rada ESI
6. Razvoj novih vibracionih aktuatora za otresanje (zamena čekića efikasnijim elektromagnetnim vibracionim i udarnim aktuatorima)
7. Optimizacija vibraciono-transportnih pogona u sistemu za evakuaciju pepela.

LITERATURA

- Ken Parker, *Electrical operation of electrostatic precipitators*, 3rd, IEE Power and Energy, London, 2003
- S.Vukosavić, Ž.Despotović, I.Cvetković, *Savremene metode elektrostatičkog izdvajanja čestica iz dimnih gasova na termoelektranama i toplanama*, Studija urađena u okviru projekta Ministarstva nauke TR3022, ETF, Univerzitet Beogradu, Institut Institut M.Pupin, Univerzitet u Beogradu, Beograd 2006.
- Prezentacija „Electrostatic Precipitators“ OBRENOVAC –A5, TRAINING, ESP Factory ELVO S.A , 2008.
- Ž.Despotović, S.Vukosavić, M.Bakić, *Savremeni elektrostatički izdvajači*, ENERGIJA-ekonomija-ekologija, Vol 3, pp.237-247, 2010.

Hvala na pažnji !!!



Dr Željko Despotović

Beograd, Mart 2020