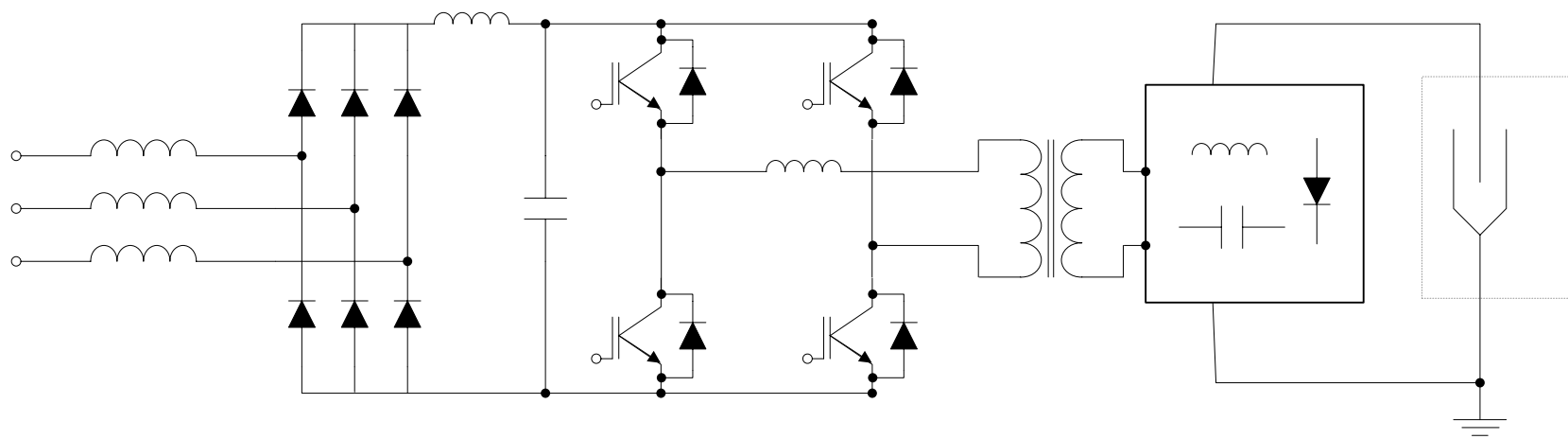




Електротехнички факултет Универзитета у Београду
Одсек за енергетику, лабораторија за дигитално управљање ЕПП

Експлоатациона испитивања ВФВН напајања електрофилтара у ТЕ Морава

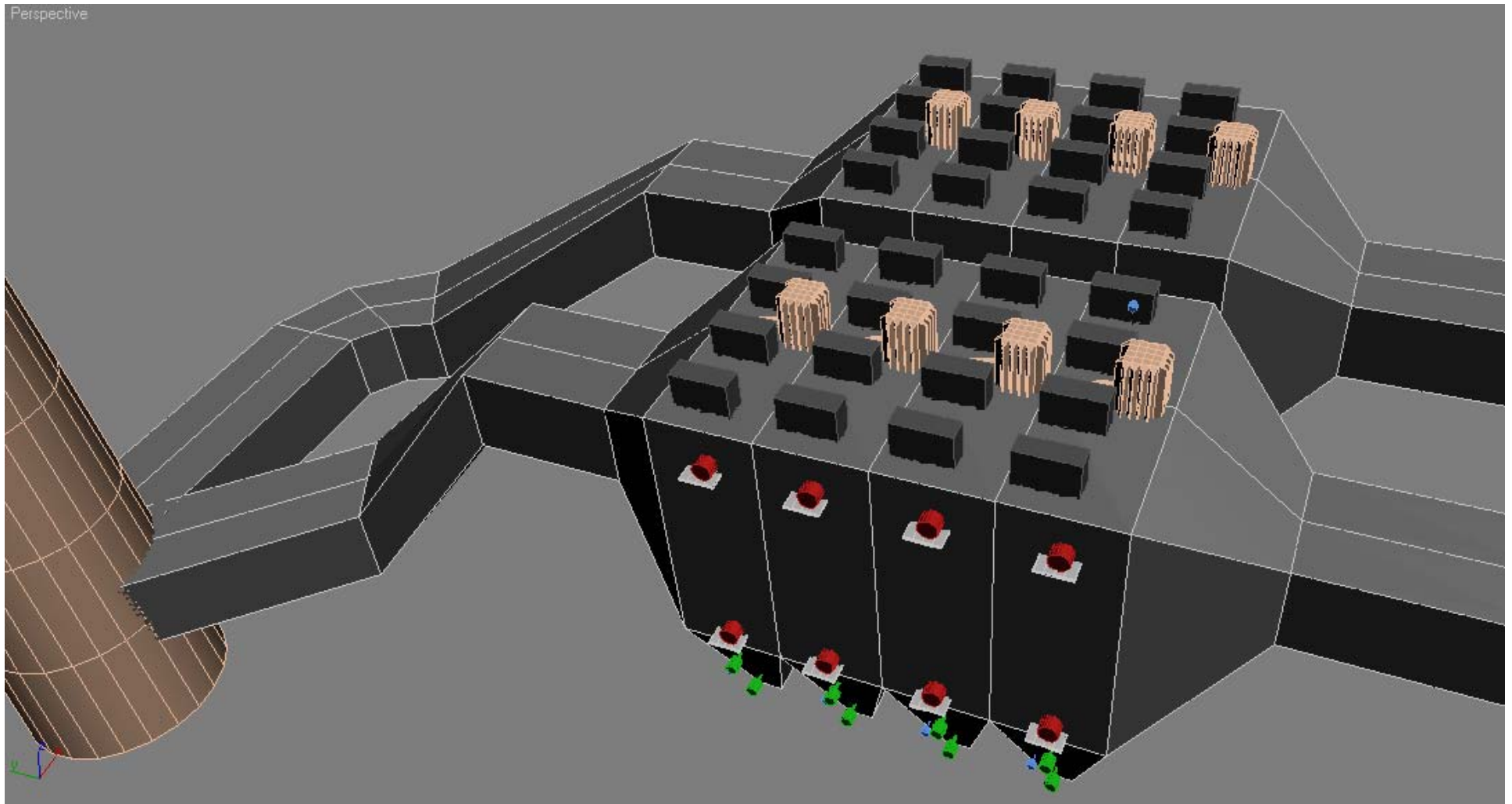
13. јун 2008. – 21. јул 2010.



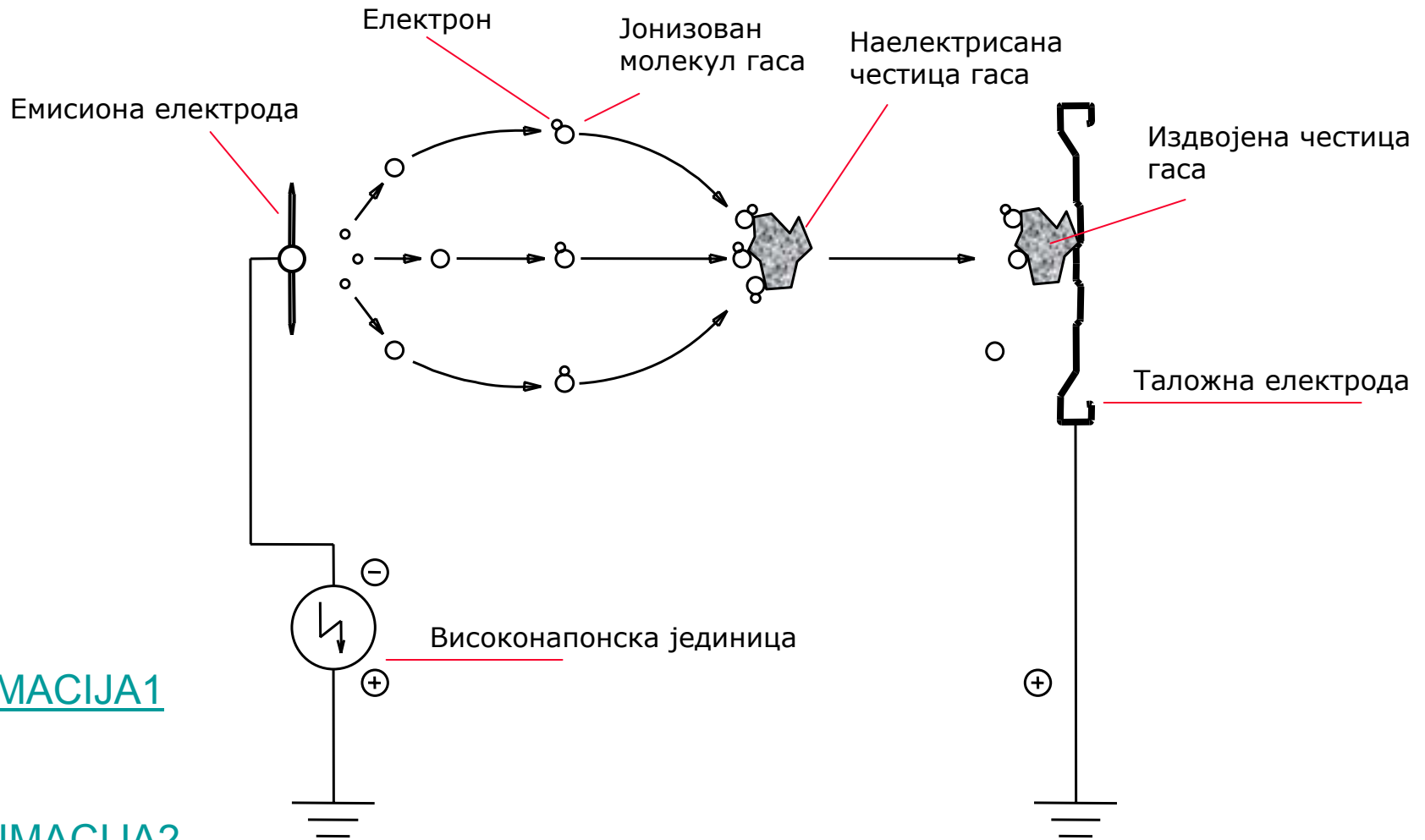
20-22% тежине угља садржано у димном гасу

Запрашеност на излазу из котла: $20\text{-}40 \text{ g/m}^3$

Дозвољена запрашеност у димњаку: 50 mg/m^3



Принцип рада



[ANIMACIJA1](#)

[ANIMACIJA2](#)

Основни принципи рада:

Негативна корона на емисионим електродама ствара јонизоване честице

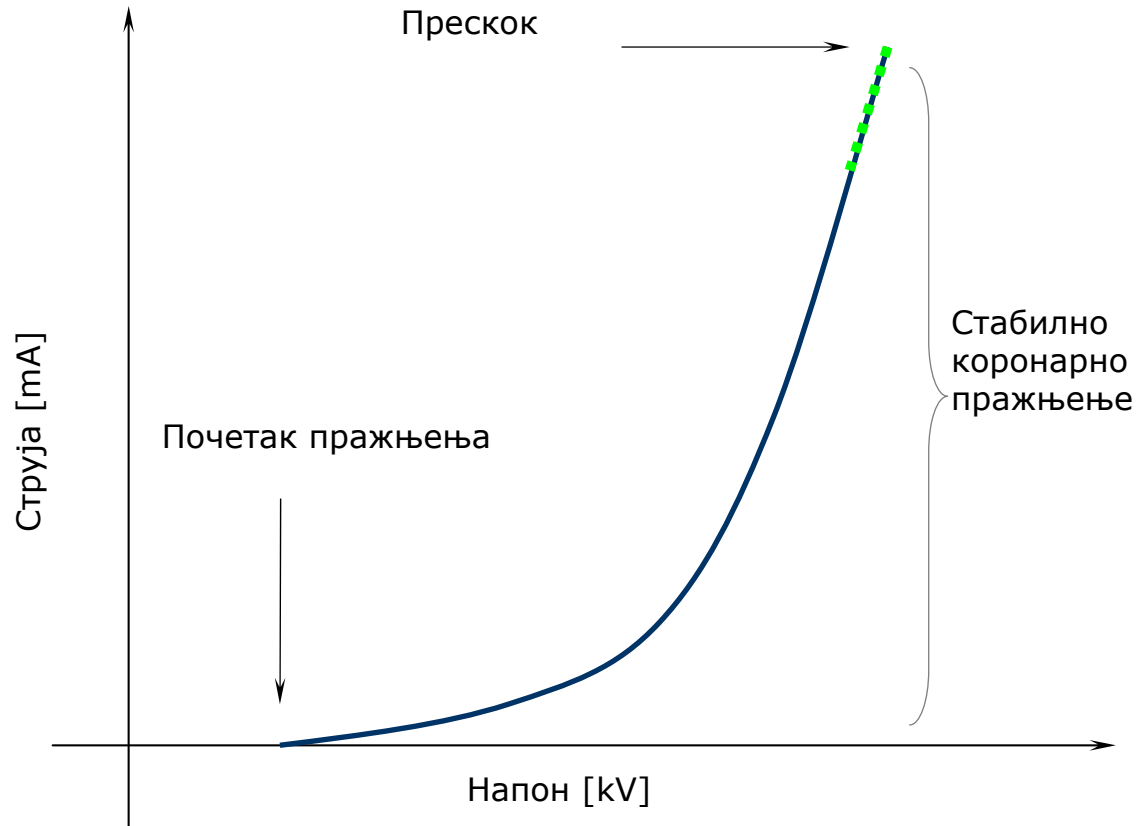
Дифузијом и ефектом поља се обавља наелектрисање честица пепела

Деловањем електричног поља, остварује се миграција честица пепела према таложној електроди, брзином до 20 cm/s

Слој наталоженог пепела се отреса и пада у левак

Проблем регулације - UI карактеристика:

Ефикасна корона тек при 80-90 % пробојног напона

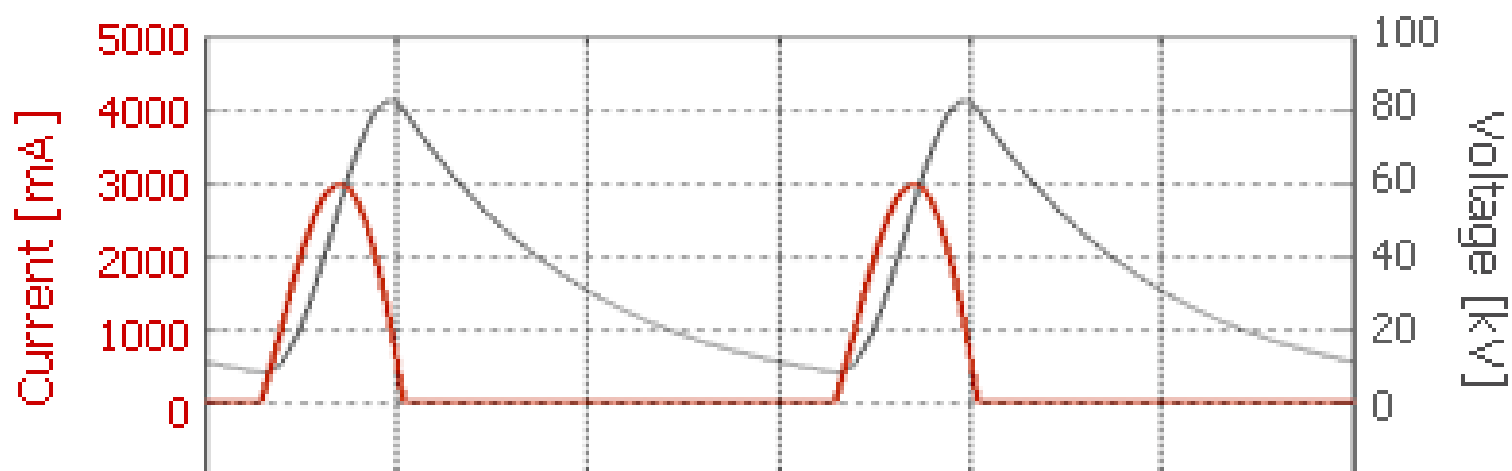
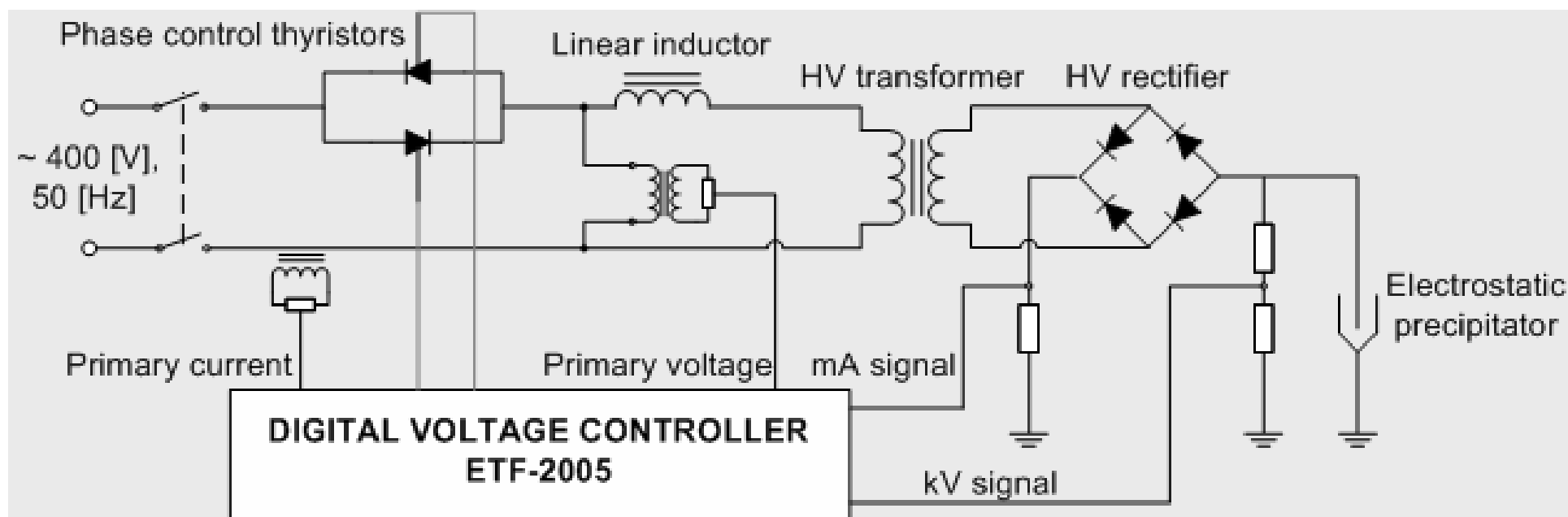


Напајање и управљање ЕСП – стање

- (1) Конвенционално, 50 Hz напајање са тиристорима
- (2) ВФ ВН напајање са $f = 10-20$ kHz, ВФ трафоом ВН делом
- (3) Импулсно напајање, Типични параметри импулсног напајања су $\Delta t = 5-10\mu s$, $\Delta I = 5-7$ kA, $U_{max} = 200$ kV.
Проблеми Електромагнетске сметње
- (4) Раздвајање процеса јонизације и преципитације,
 - а) комора за издвајање са паралелним плочастим електродама
 - б) DBD реактор за производњу хладне плазме која се потом уводи у струју гаса коморе (а)

За DBD реактор потребан АС напон 20 kHz, 100 kV

Конвенционално напајање



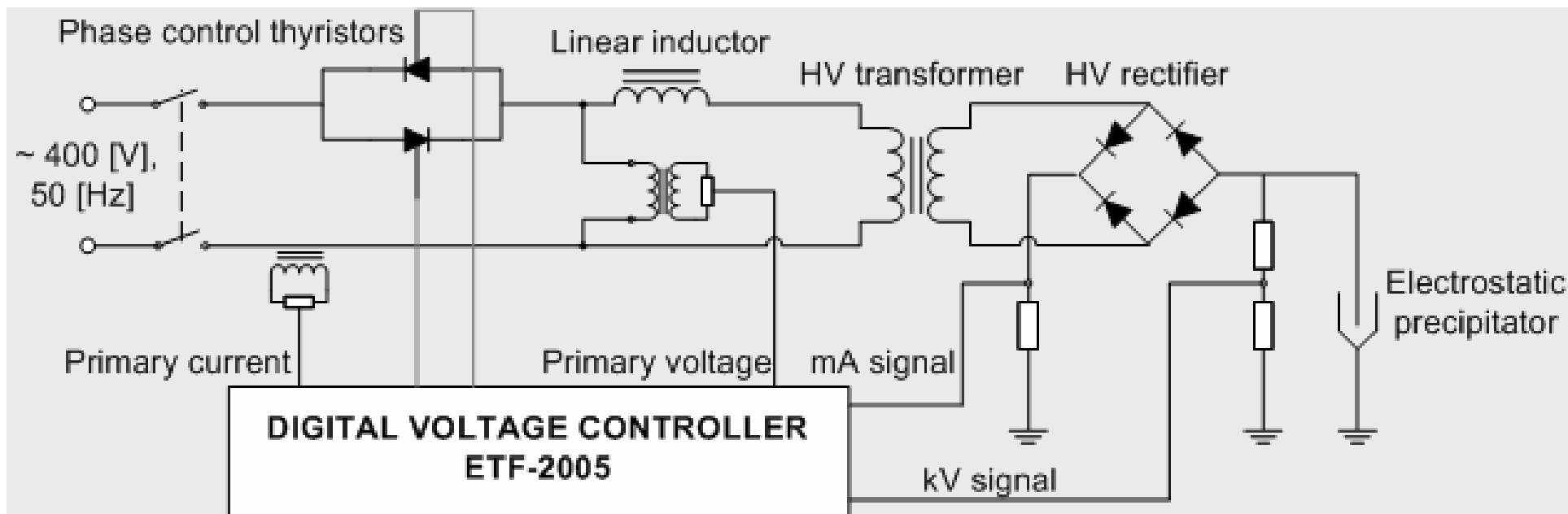
Конвенционално напајање:

Најчешће коришћено,

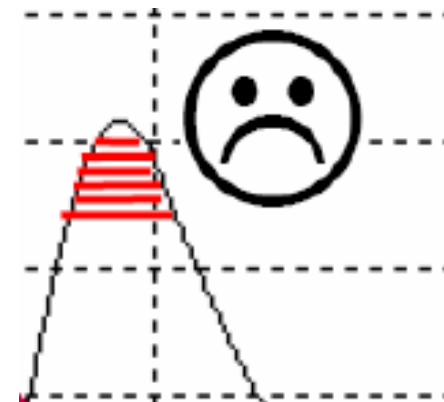
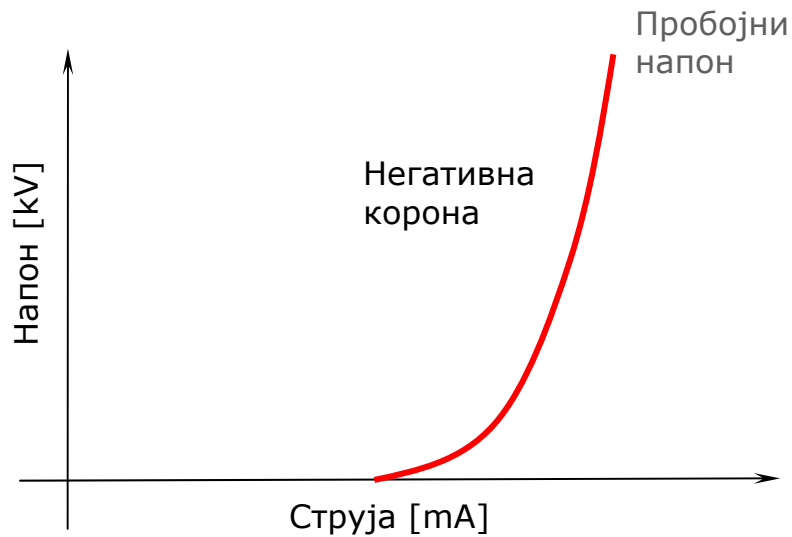
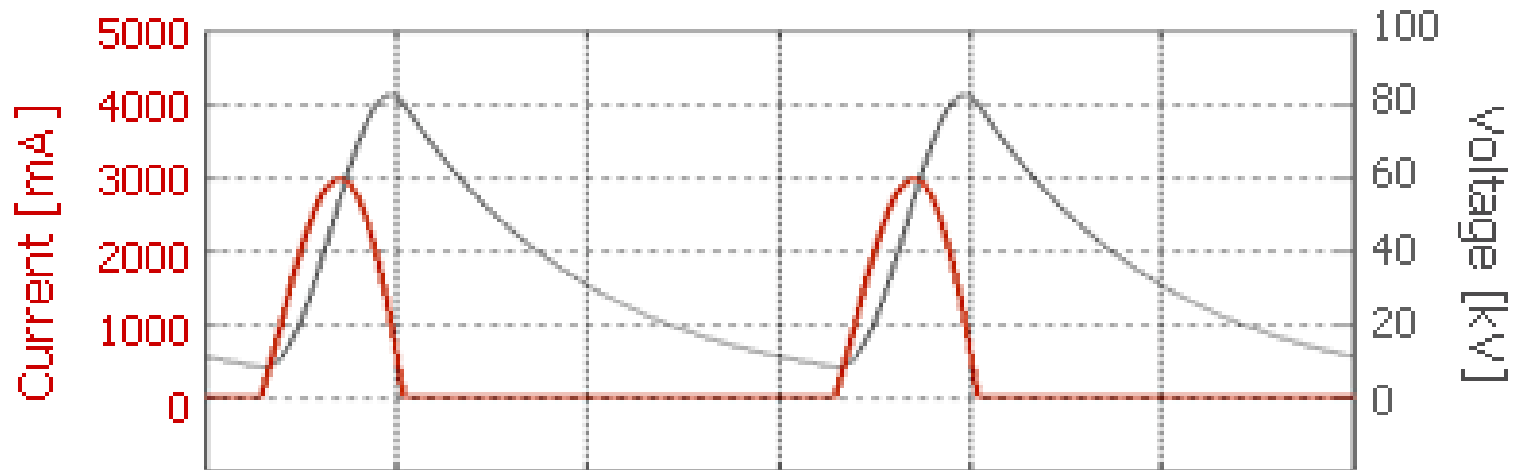
Поуздано,

Познато,

Прихваћено

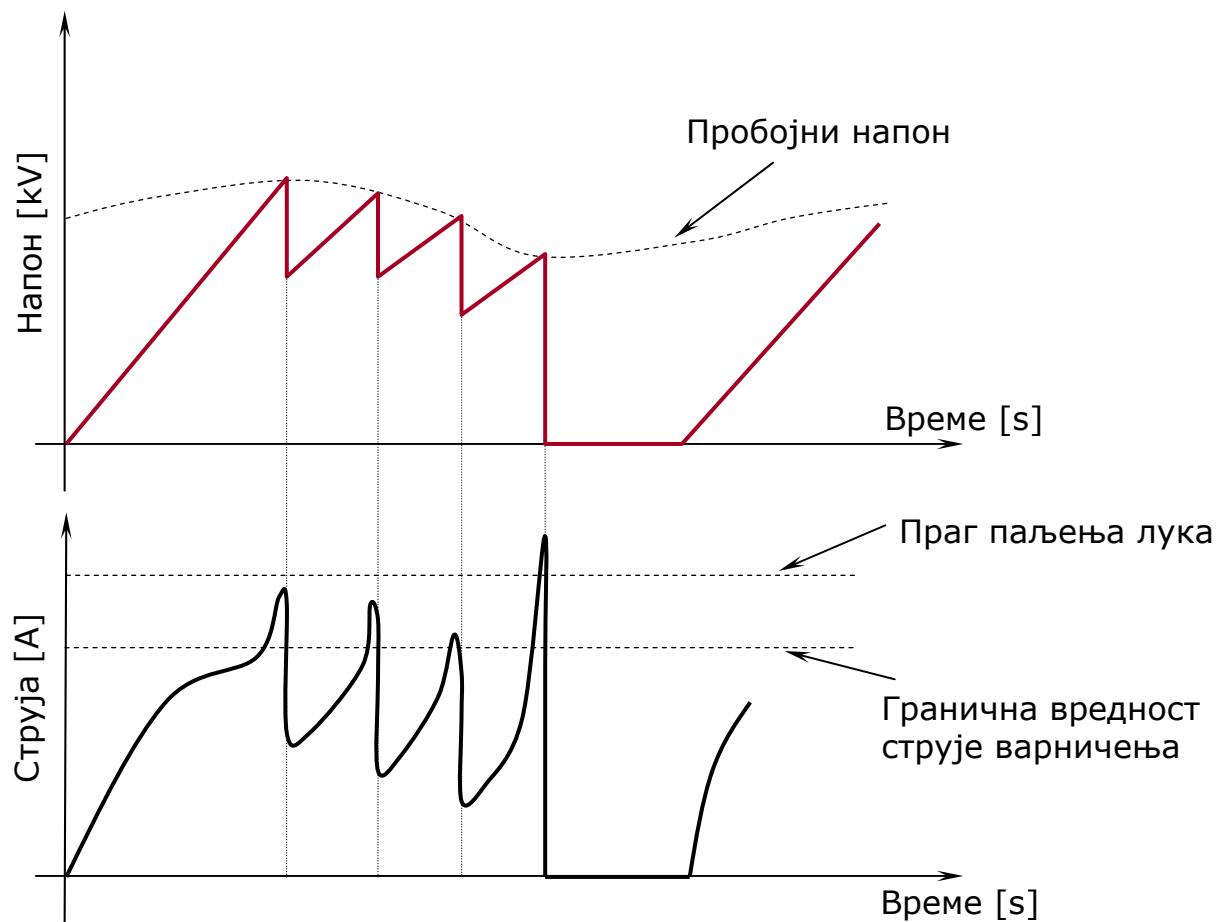


Конвенционално напајање - облик напона



Рад тиристорског система код варничења

::: Детекција варнице >> искључење >> дејонизација >> пауза >> укључење



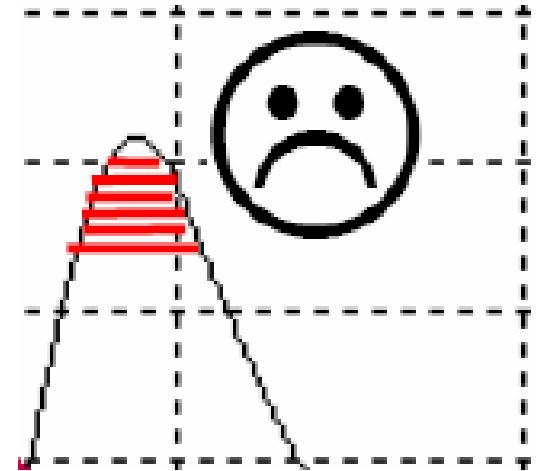
Напон издвајача и примарна струја ВН трансформатора

Проблеми код прескока и лука

- Код успостављања лука, струја се не може прекинути током једне мрежне полупериоде, до комутације тиристора
- Енергија лука добија се из извора, захваљујући примарној струји која постоји све до комутације тиристора. Поред тога, лук се снабдева и енергијом акумулираном у еквивалентној капацитивности филтра (50-100nF).
- Типична енергија лука је 130 – 200 J.
- Време потребно за евакуацију усијаних и јонизованих честица гаса је типично 40ms – 100ms (дејонизација). Током дејонизације напајање је искључено.

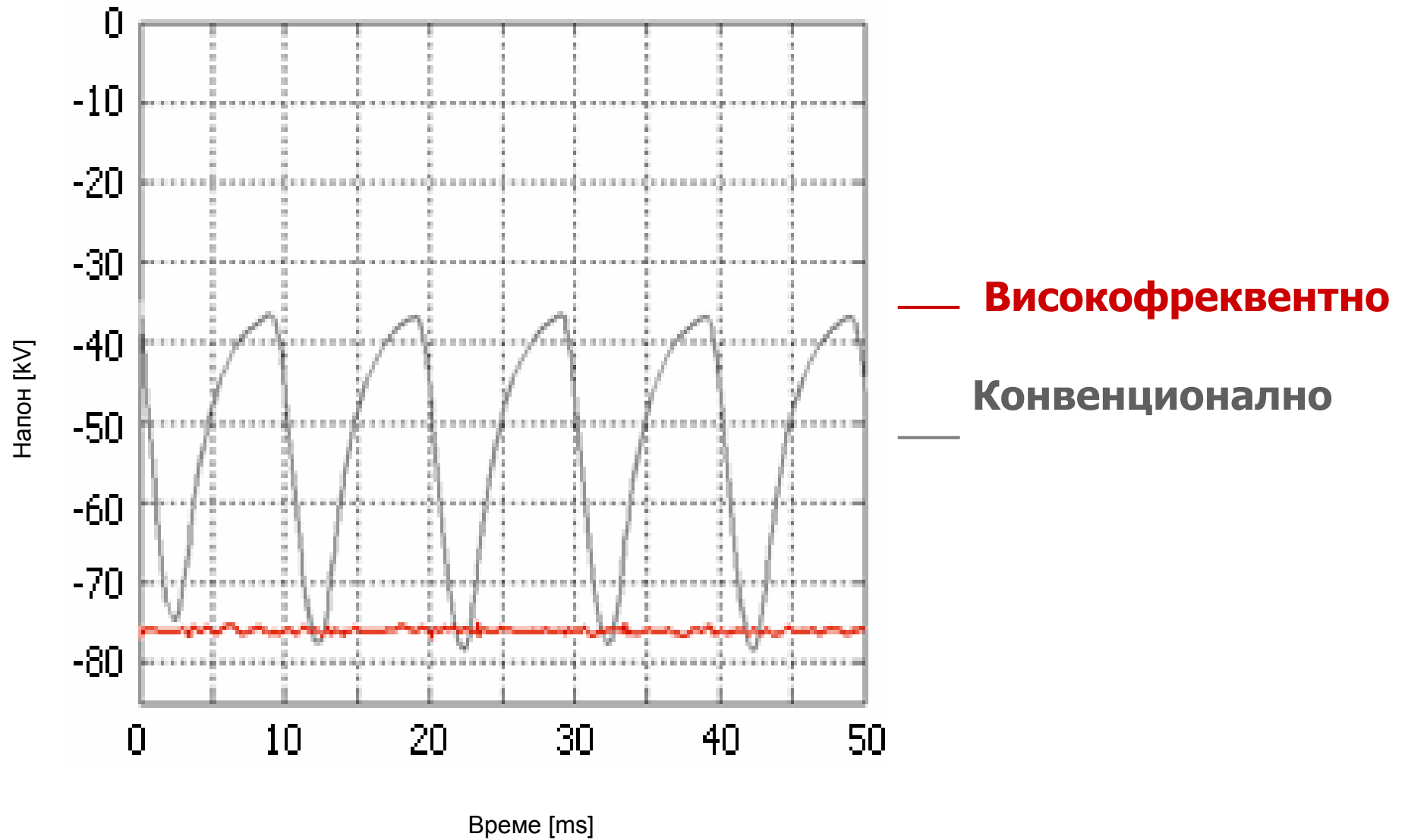
Експлоатационе карактеристике

конвенционалног напајања

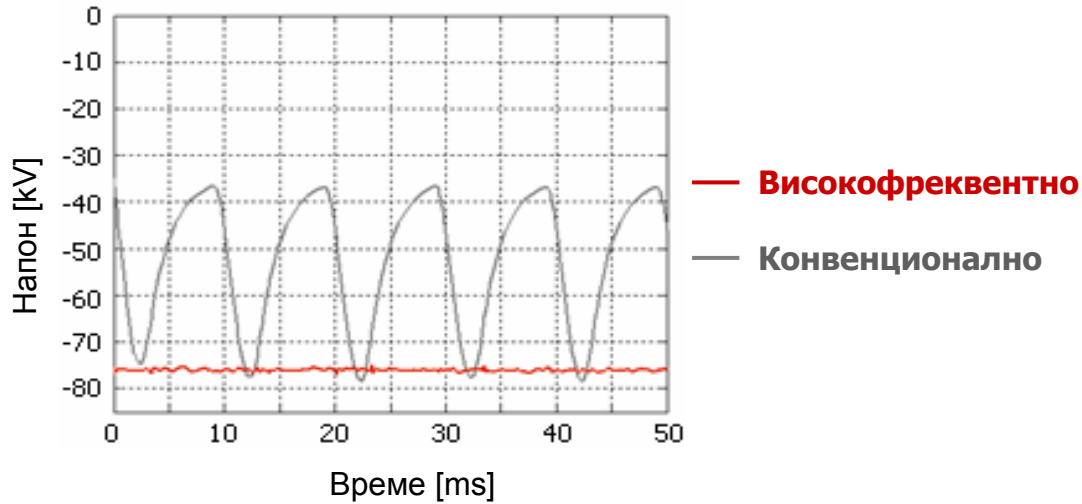


- Немогуће издвајање ултрафиних честица
- Неопходна већа површина електрода, око 30-40% више челика
- Мала енергетска ефикасност и ефикасност издвајања
- Лош рад са високоотпорним пепелом, повратна корона
- Лоша управљивост и отресање, металуршко сједињавање пепела
- Енергија варнице 130 – 200 J, деградација електрода
- Дејонизација 40ms – 100ms, дуги интервали без напајања
- Рад током 1-2ms у свакој полупериоди мреже
- Лош фактор облика линијске струје
- Велика реактивна и привидна снага, мали степен корисног дејства

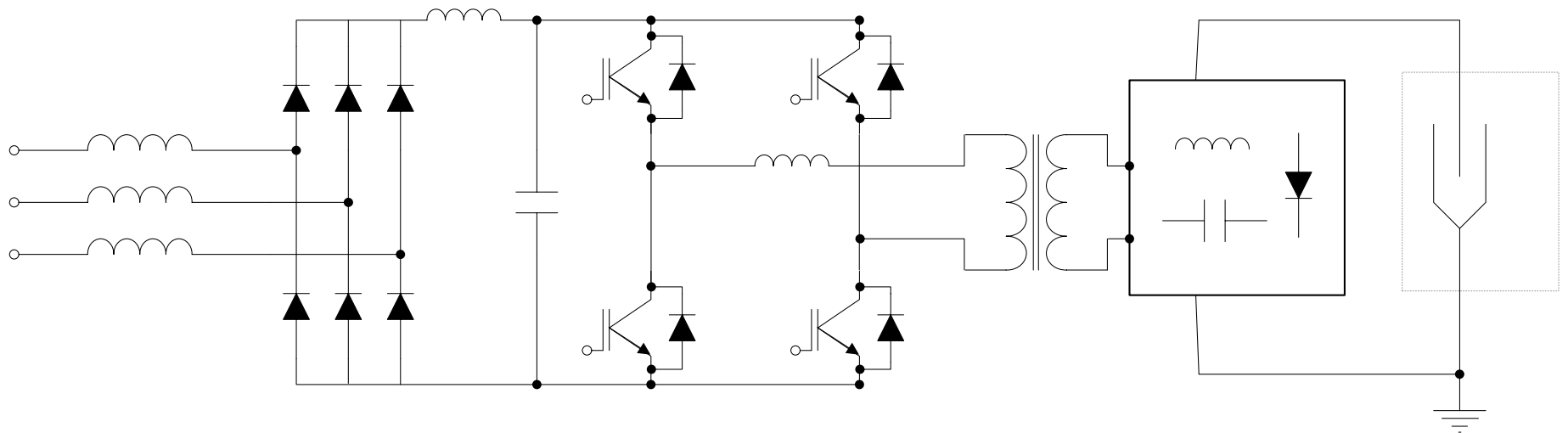
Идеја ВФ ВН напајања



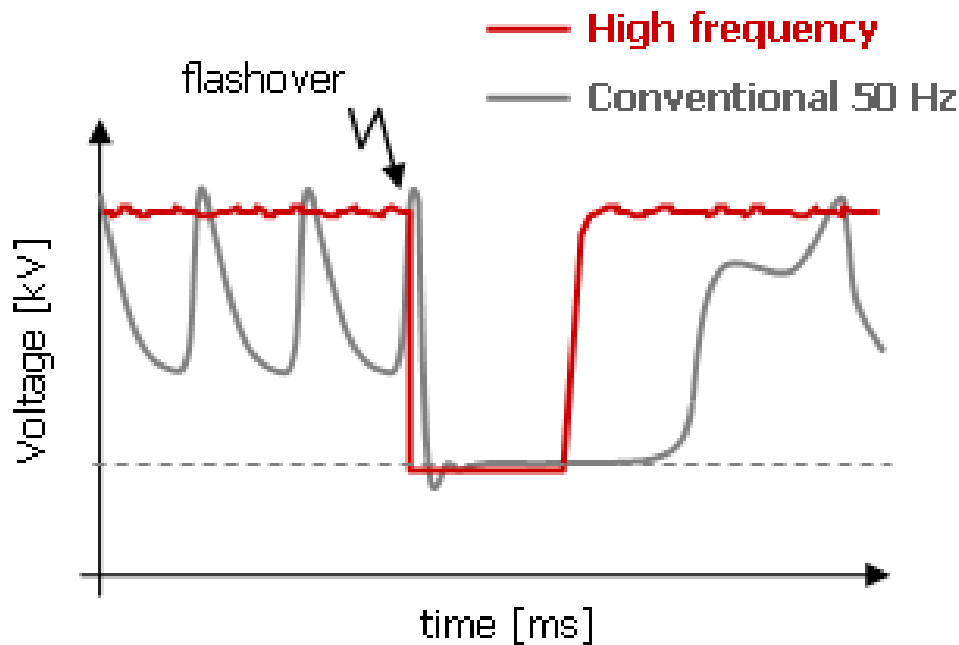
ВФ ВН напајање



Присуство 10-20 kHz импулса на секундару у садејству са капацитивношћу плоча $C = 50\text{nF}$.. 100nF даје исправљени напон без пропада и потпуно искоришћење расположивог времена и електрода



Брзина реаговања



<<< Брза реакција на прескок

<<< Вишеструко мања енергија

Енергетска ефикасност

	50Hz систем	ВФВН систем
$\cos(\varphi)$	< 0.65	> 0.95
$\lambda=P/S$	< 0.5	> 0.75

Поређење конвенционалног са високофреквентним системом

Ефикасност издавања

-- Мерења која је спровео Siemens (Norbert Grass)

ВФ напајање даје **двоструко већу струју I_{DC}** (короне) од конвенционалног напајања као и **2-4 пута мању запрашеност** излазног гаса у улазним секцијама/зонама ЕСП, као и да дају компактан агломерат наталоженог пепела код излазних секција због значајно веће брзине миграције.

ВФ ВН напајање - предности

- Четири пута мања енергија варнице (35 J, енергија кондензатора)
- Дејонизација траје 2ms – 10ms, безнапонске паузе минимизирани
- Потребна површина електрода је за 30% мања
- Пуно искоришћење времена и расположивих електрода
- Факор снаге близак 1, занемарива реактивна снага
- Велики степен корисног дејства, мали губици
- Могуће брзо управљање напоном, координисано са отресањем

ВФ ВН напајање – истраживање у свету

- Siemens центар за ЕСП користи напајања са радном учестаношћу IGBT моста од 10 kHz и радном учестаношћу трансформатора од 500 Hz
- Siemens је својевремено производи уређај PIC 410F, 10 kHz
- U.K. базирани GENVOLT производи уређаје снаге до 50 kW, 20 kHz
- Alstom производи уређај SIR
- FL Schmith производи уређај FLS SMPS, 10 kHz
- NWL производи ВФ ВН трансформаторе

ВФ ВН напајање проблеми у раду

-- **Hard-switched SMPS, старење изолације**

Значајан број до сада коришћених ВФ ВН уређаја ради на hard-switched начин, уз импулсне, правоугаоне облике напона и струје са веома великом стрмином. Високе вредности dV/dt у секундарном колу доводе до диелектрофорезе и убрзаног старења изолације

-- **Паразитни елементи трансформатора, диелектрофореза**

Преостали уређаји имају квази-синусоидалне облике и поседују резонантно коло у примару. Овиме се проблеми ублажују, али се не уклањају у потпуности, јер ВН диодни исправљач и даље има стрме облике што доводи до напрезања изолације

-- **Проблеми у коришћењу IGBT и DSP технологија**

Недостатак искуства у раду са DSP технологијама и IGBT инверторима велике снаге у компанијама које су се традиционално бавиле производњом напајања за ЕСП



Домаће решење

1. Дистрибуирана мултирезонантна топологија
2. Управљање на бази анализе спектра U , I
3. Адаптивно управљање по броју варница
4. Zero-current комутације
5. Тест убрзаног старења: Век од 20 година

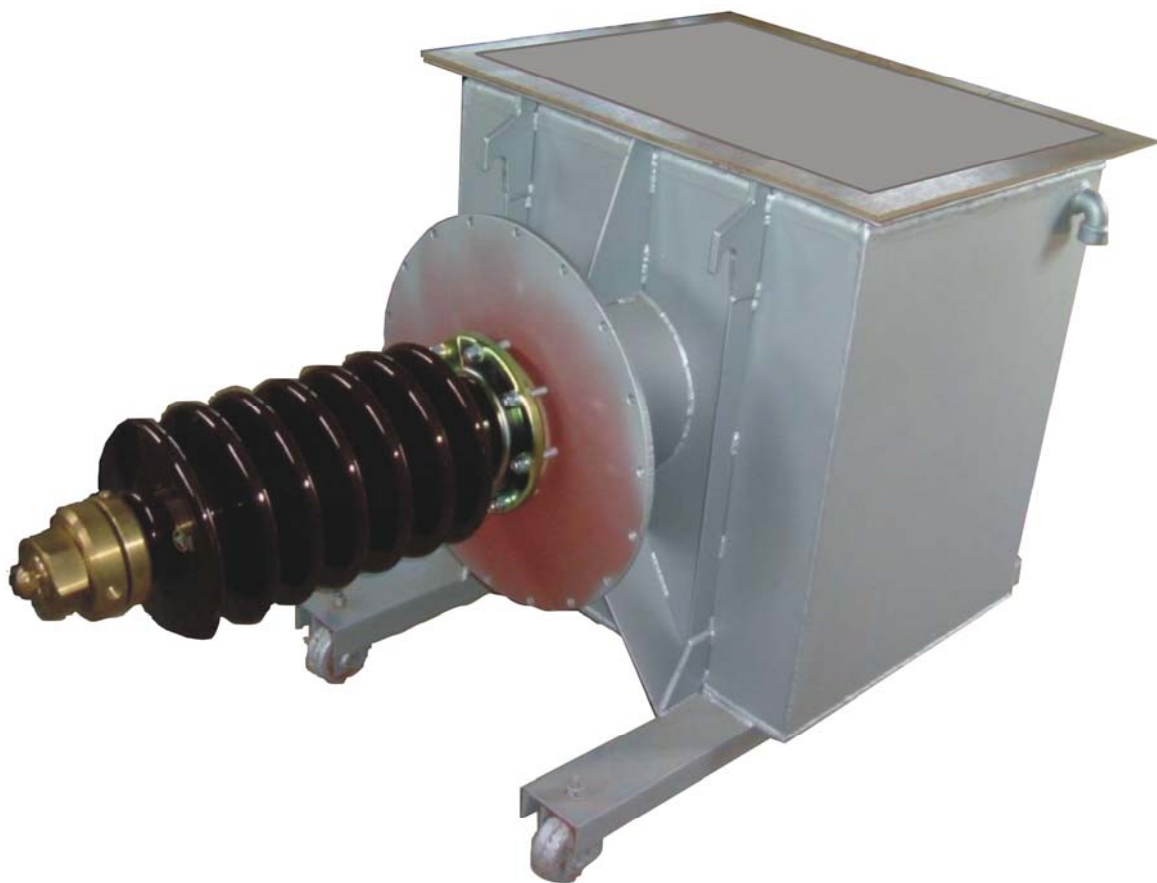
ВФ ВН напајање: искуства у Србији

-- Мултирезонантна технологија ВФВН трансформатора

Домаћи ВФ ВН трансформатор снаге 100 kW има активни материјал тежине $m = 50 \text{ kg}$. Мултирезонантно коло је дистрибуирано на секундару, тако да се уклањају ефекти диелектрофорезе

- Опрема за $S = 100 \text{ kVA}$ је 5 пута мања, 5 пута лакша и до 30% јефтинија
- Мерена енергија варнице свега 1.5 J од стране извора (остатак до 30 J због пражњења капацитивности плоча)
- Одзив на промену жељене вредности напона у току 100 μs
- Степен корисног дејства система већи је од 97%

ВФ ВН напајање 70 kV, 1000mA



ИСКУСТВА У СРБИЈИ: КОНЦЕПТ

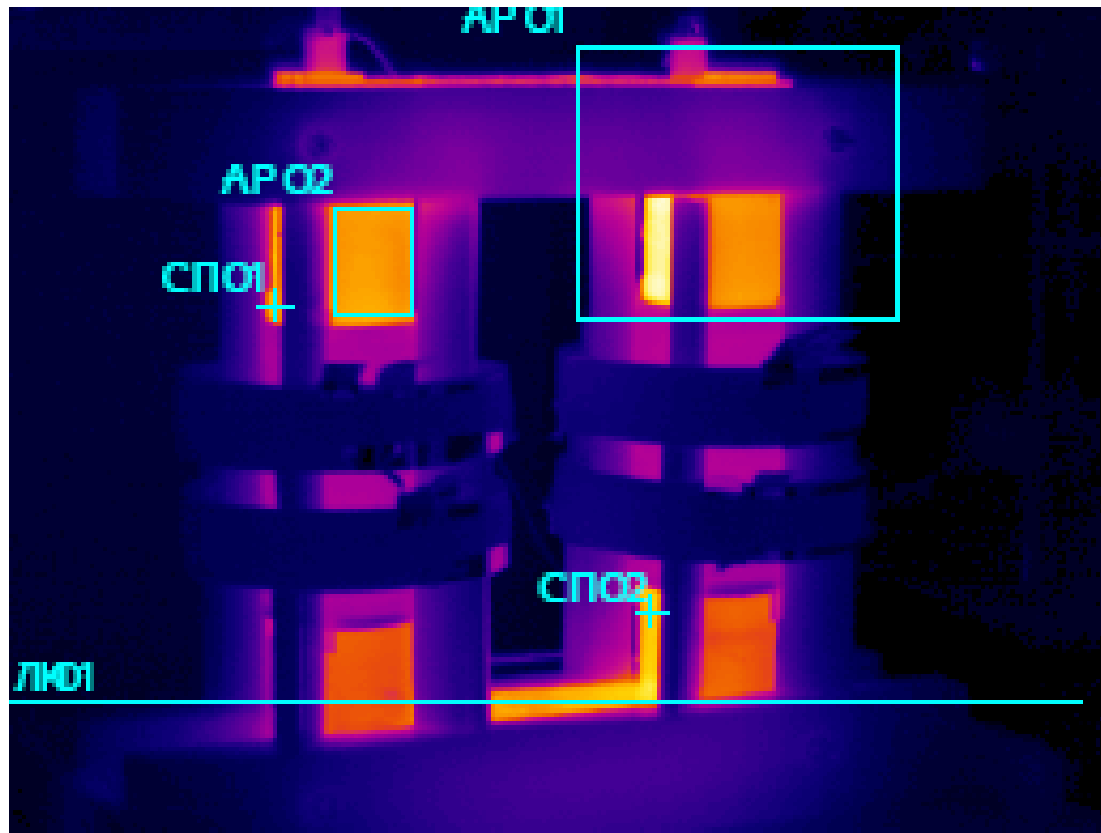
Паралелно са исправљачким диодама,
дистрибуирано мултирезонантно коло које
осигурава ZVZC комутацију на ВН диодама и
благе облике

Унутрашњост трансформаторског суда

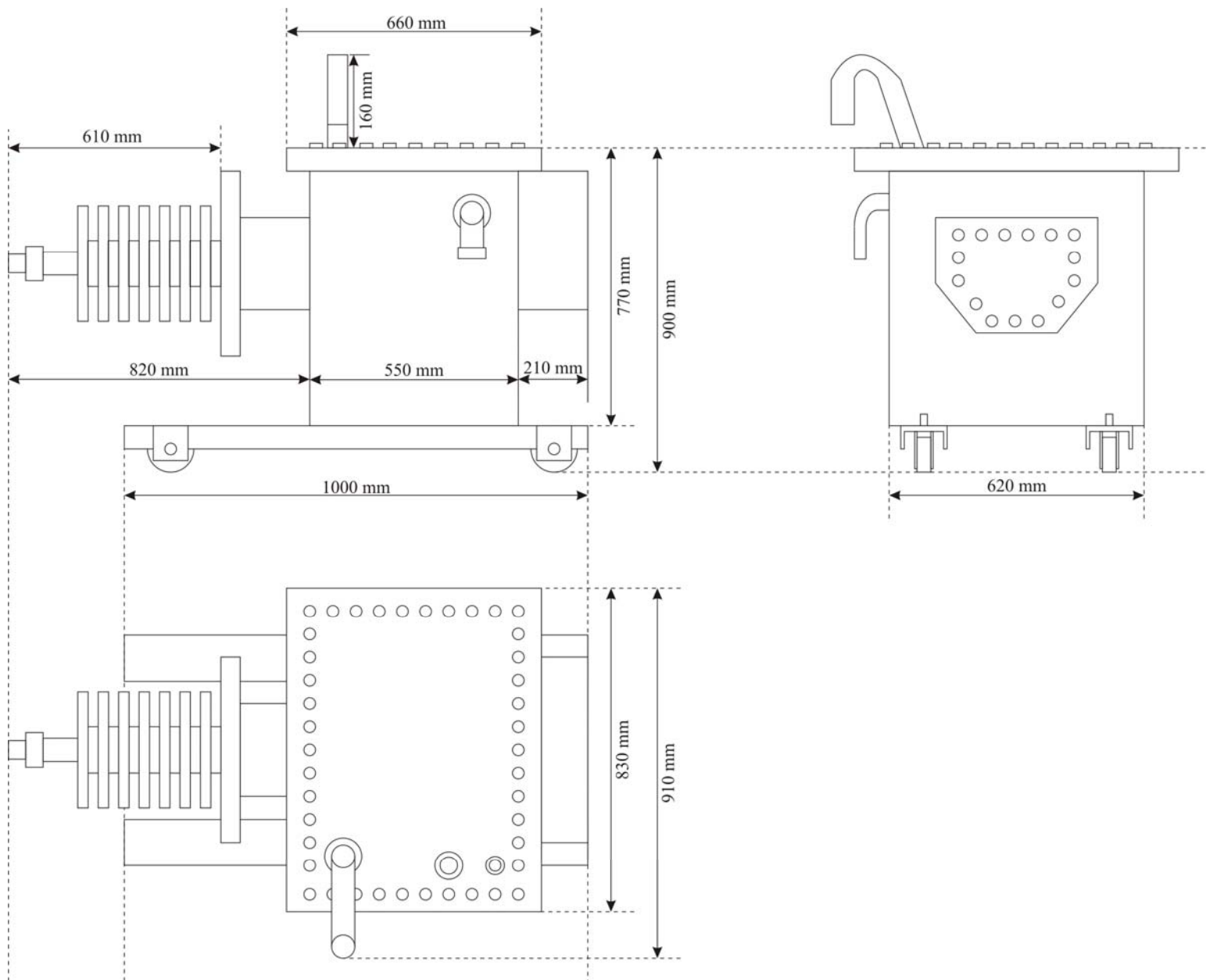
Уједначаваачи потенцијала и калемови

Стабилност температуре језгра

Температура језгра и намотаја је уједначена, што говори о томе да су проблеми увећаних губитака услед скин ефекта решени



Мале димензије и тежина, до 5 x мање



Hopme

Low Voltage Directive (73/23/EEC)

EMC directive (89/336/EEC)

CEI EN 60204-1, par. 6.2.3, 20.3, 20.4

IP Code, EN60529

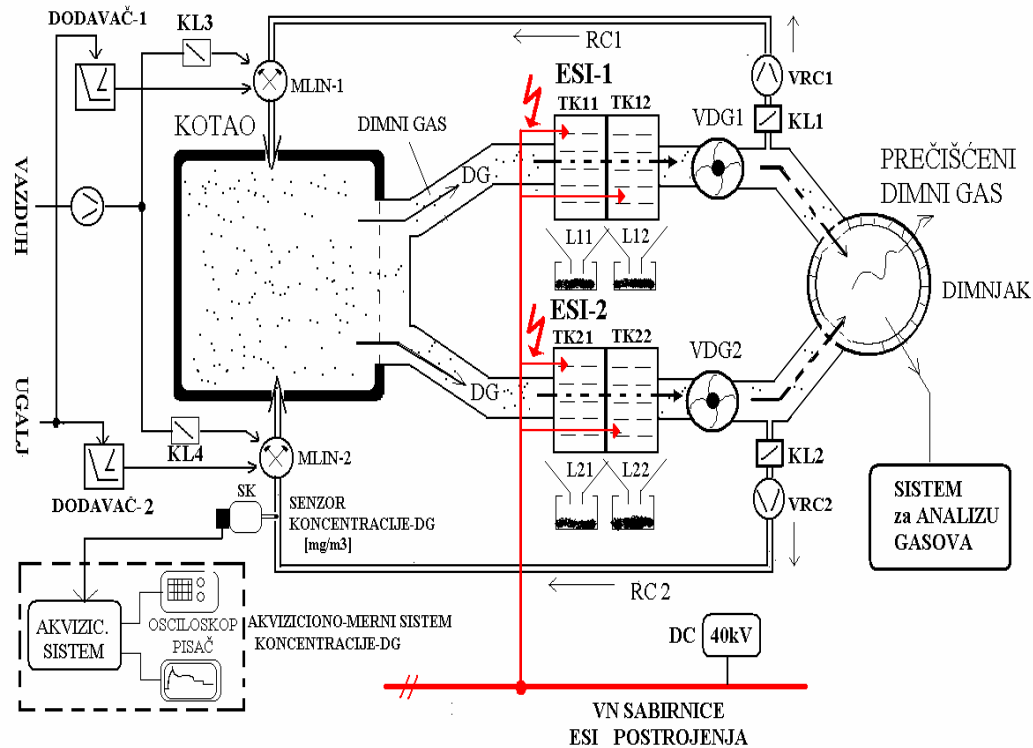
CEI EN60800-3

EN60800-3/A11

Опрема уграђена у ТЕ Морава

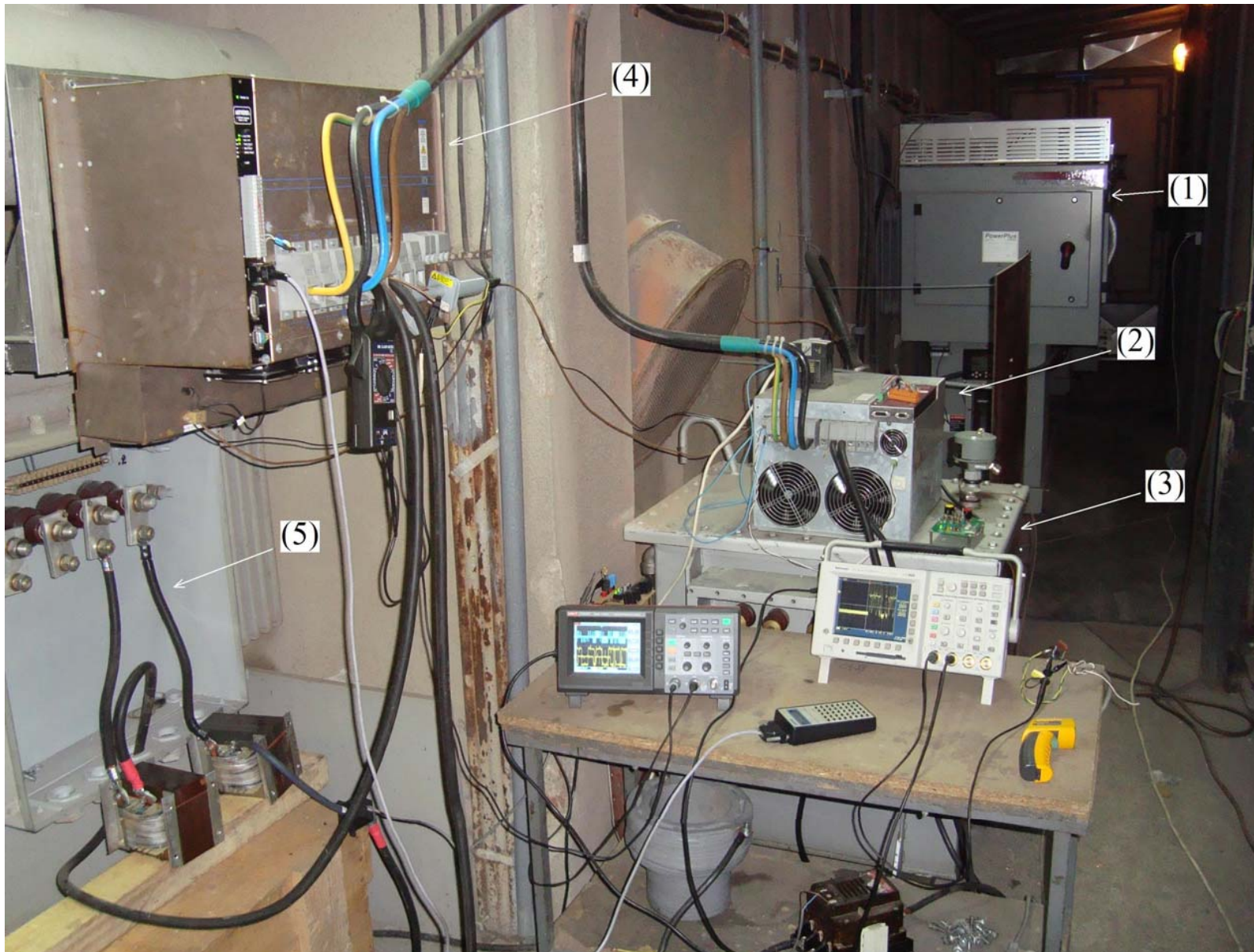
- 4 ВФВН извора
- Систем ВН растављача за избор ВФВН / 50 Hz
- Мерна група за мерење снаге и енергије
- Један трибоелектрични давач запрашености

Конфигурације у ТЕ Морава



- 4 x VFVN
- 4 x 50 Hz
- 2 x VFVN + 2 x 50 Hz

Изглед опреме



Давач са АС-triboelectric ефектом





**ЕТФ давач
запрашености у
повратном
каналу десне
ране**

Количина издвојеног пепела у левку

излазне секције

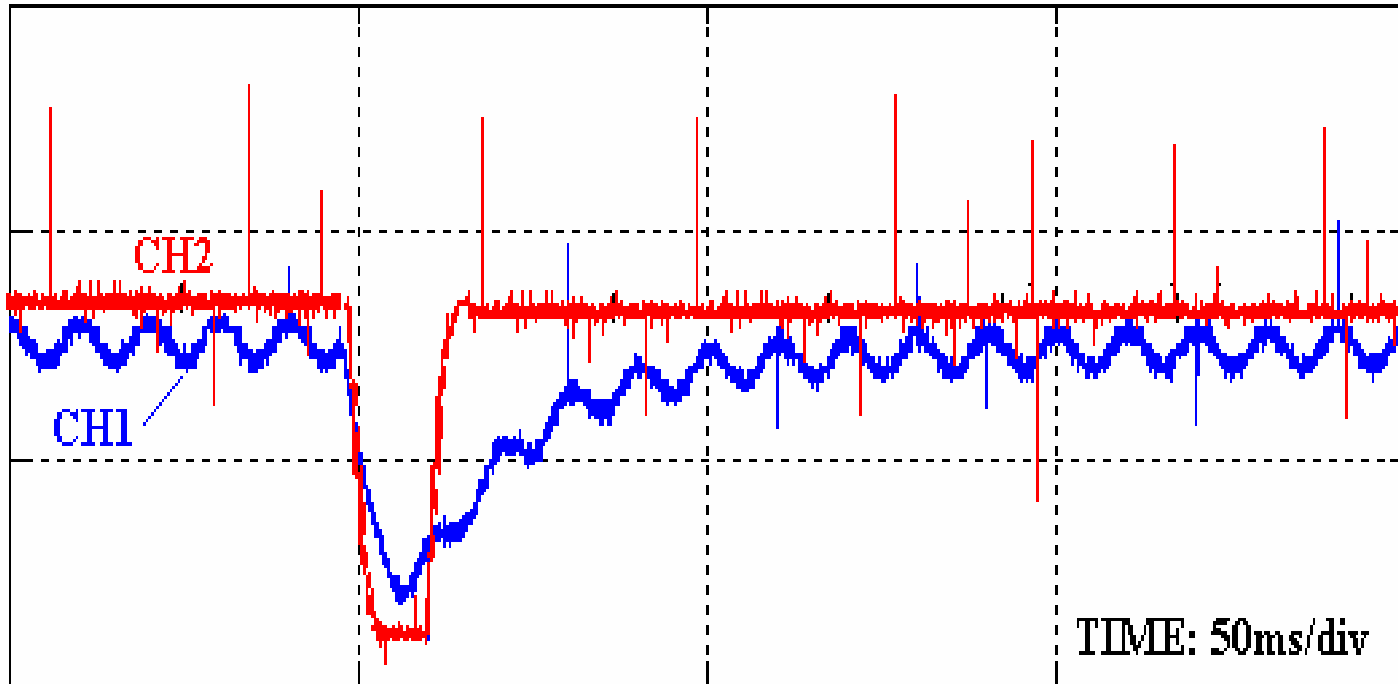
- Датум - април 2009
- Према мерењу температуре зида левка, ВФВН решење увећава количину издвојеног летећег пепела за 80%
- Објективна потреба за 2-3 пута чешћим пражњењем левка (ручно)

Субјективни утисак (април 2009)



**Изглед дима са 4 x 50 Hz напајањем (лево)
и са 2 x ВФВН + 2 x 50 Hz напајањем (десно).**

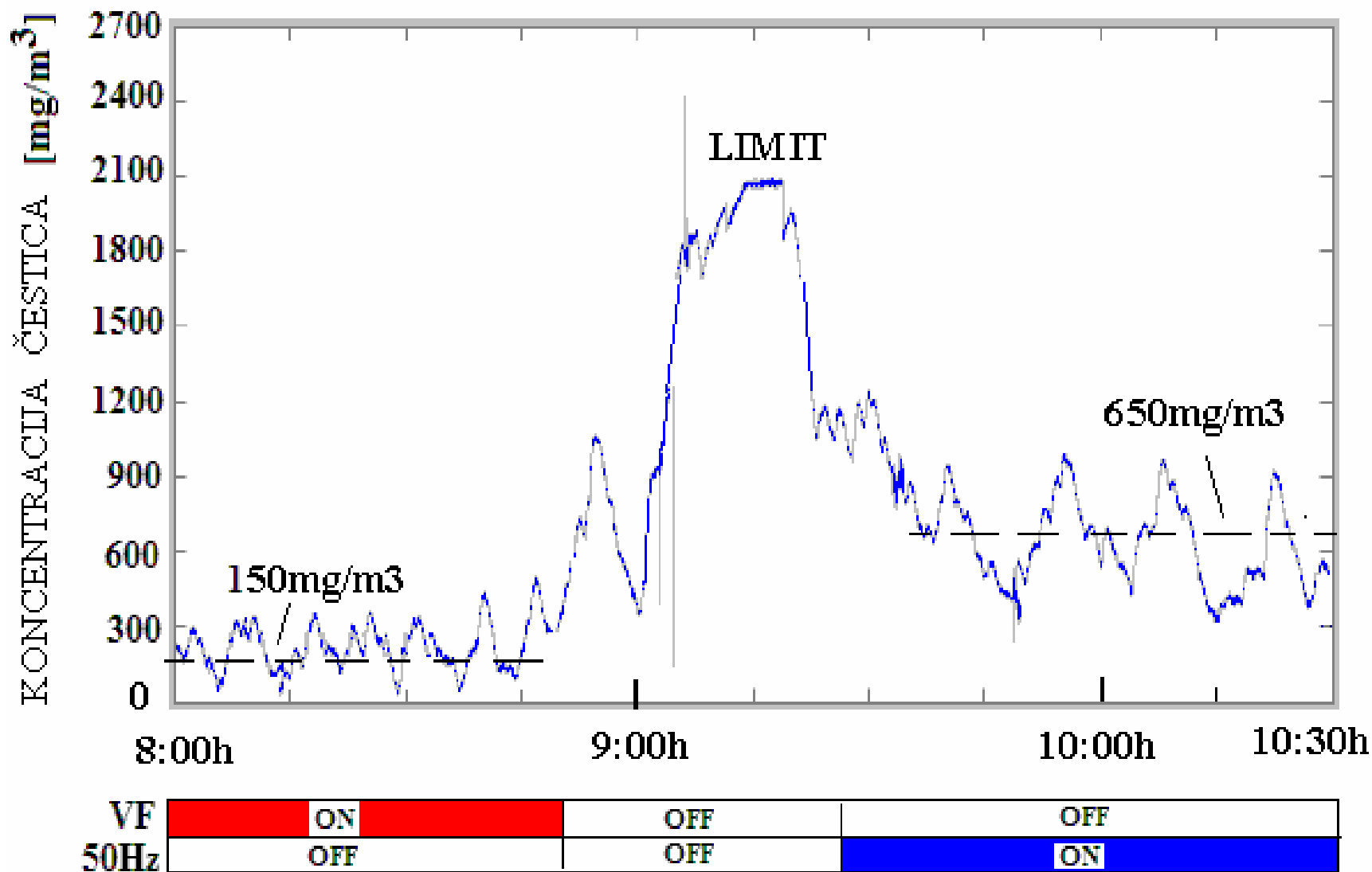
Облик напона између плоча



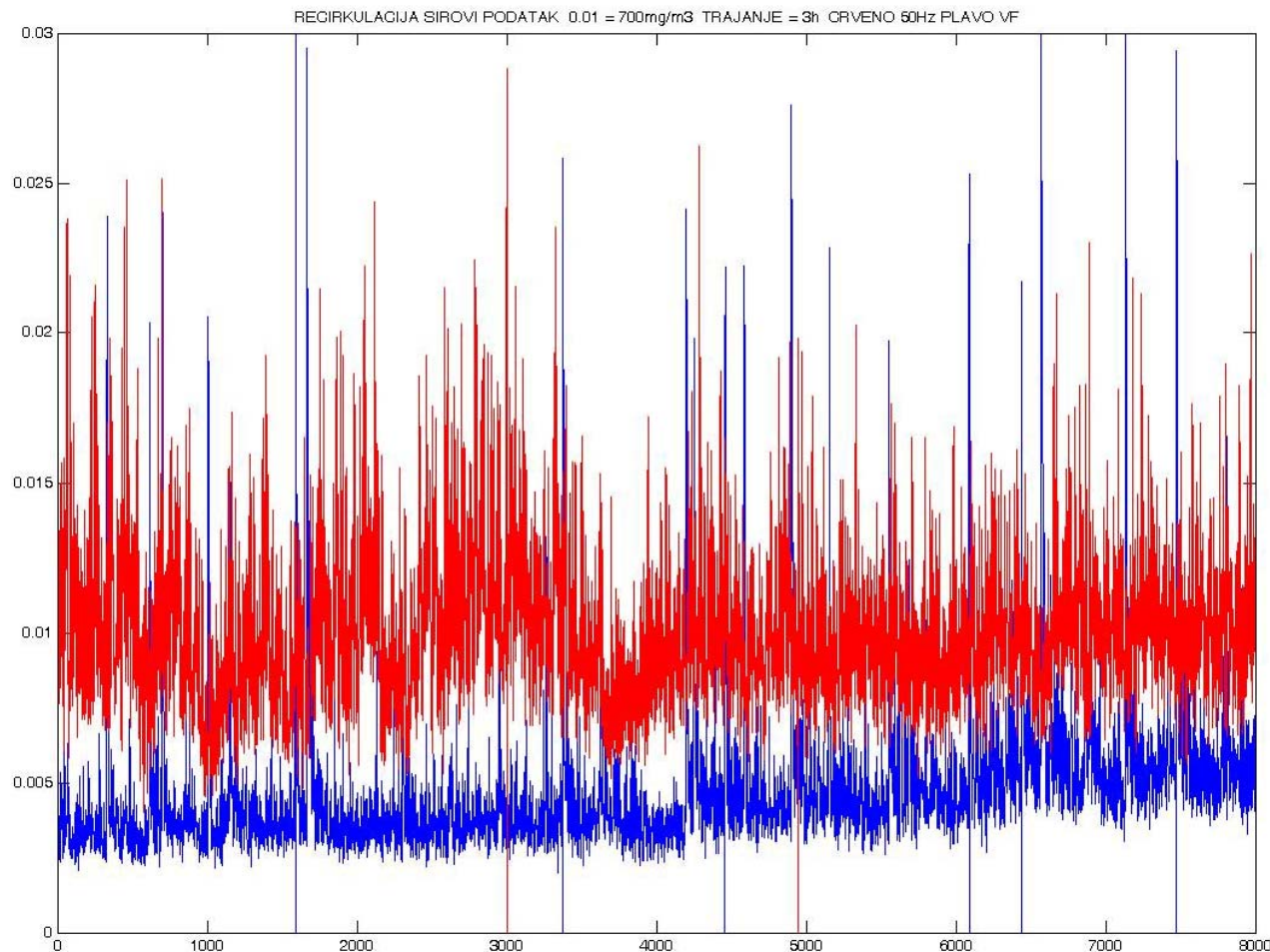
CH1: napon 50Hz ESI -20kV/div , CH2: napon VF ESI-20kV/div

мања валовитост,
већа брзина,
већа средња вредност

Поређење 4 x ВФВН са 4 x 50 Hz 2009.



Поређење 4 x ВФВН са 4 x 50 Hz 2010.



трајање: 3 сата

плава боја: ВФВН

црвено: 50 Hz

средње вредности су
350mg/m³
и 700 mg/m³

ПОРЕЂЕЊЕ НАБАВНЕ ЦЕНЕ ВФВН РЕШЕЊА И 50 Hz РЕШЕЊА ЗА 70 kV, 1000mA

Опрема са 50 Hz технологијом

50 Hz VN трансформатор FLSmidth
AIRTECH стаје **19.000 EUR**

Ормар Castelet са тиристорима,
управљањем и осталом опремом
стаје **14.000 EUR**

Укупно **33.000 EUR,**

односно **471 EUR/kW**

Опрема са 50 Hz технологијом

10 kHz VN трансформатор домаће
производње, **14.500 EUR**

Ормар управљањем, опремом и
претварачем са IGBT
транзисторима стаје **14.500 EUR**

Укупно **29.000 EUR,**

односно **414 EUR/kW**



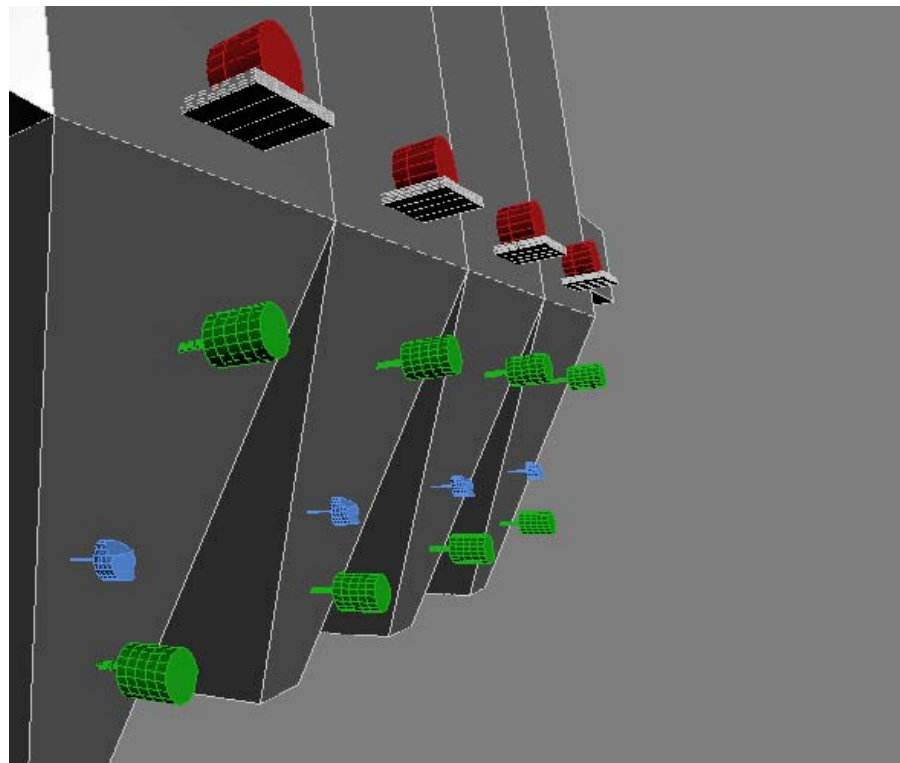
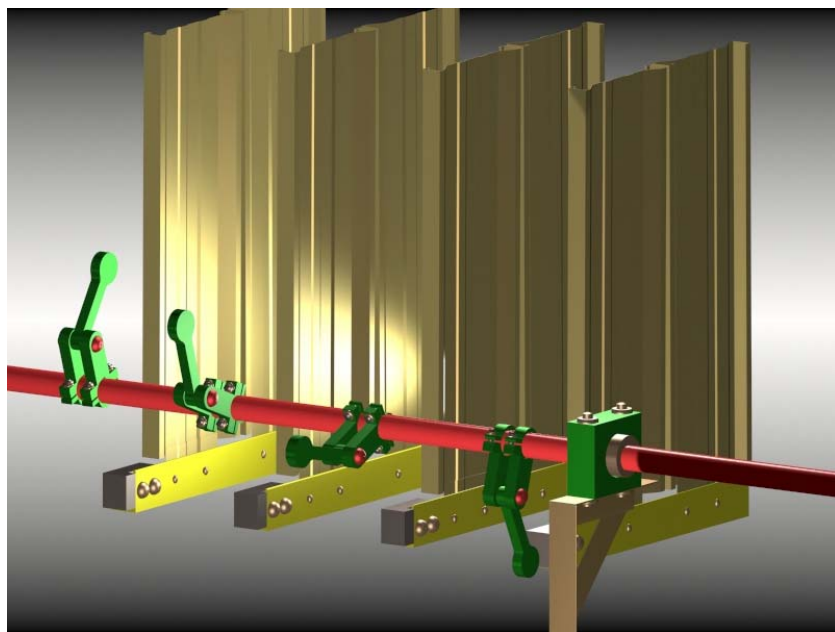
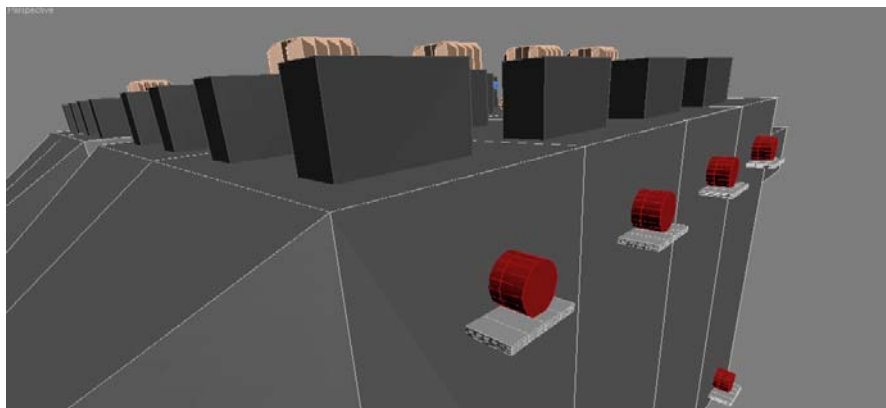
РЕЗУЛТАТИ: САЖЕТАК

1. Постоји консолидовано домаће решење базирано на резултатима пројекта МНТ, засновано на новој ВФ ВН технологији и интермитентном управљању
2. Решење је доказано у експлоатацији, технички и финансијски, даје уштеде у енергији, смањује запрашеност, захтева мању површину електрода
3. Решење има потенцијал за увећање ангажовања домаће индустрије у пословима ремонта и реконструкције.

AR70 70 kV 1000mA



ОТРЕСАЊЕ



Основни принципи рада: Наелектрисање

Честице $D < 1\mu\text{m}$ \rightarrow наелектрисање дифузијом

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

Ултра-фине честице прашине

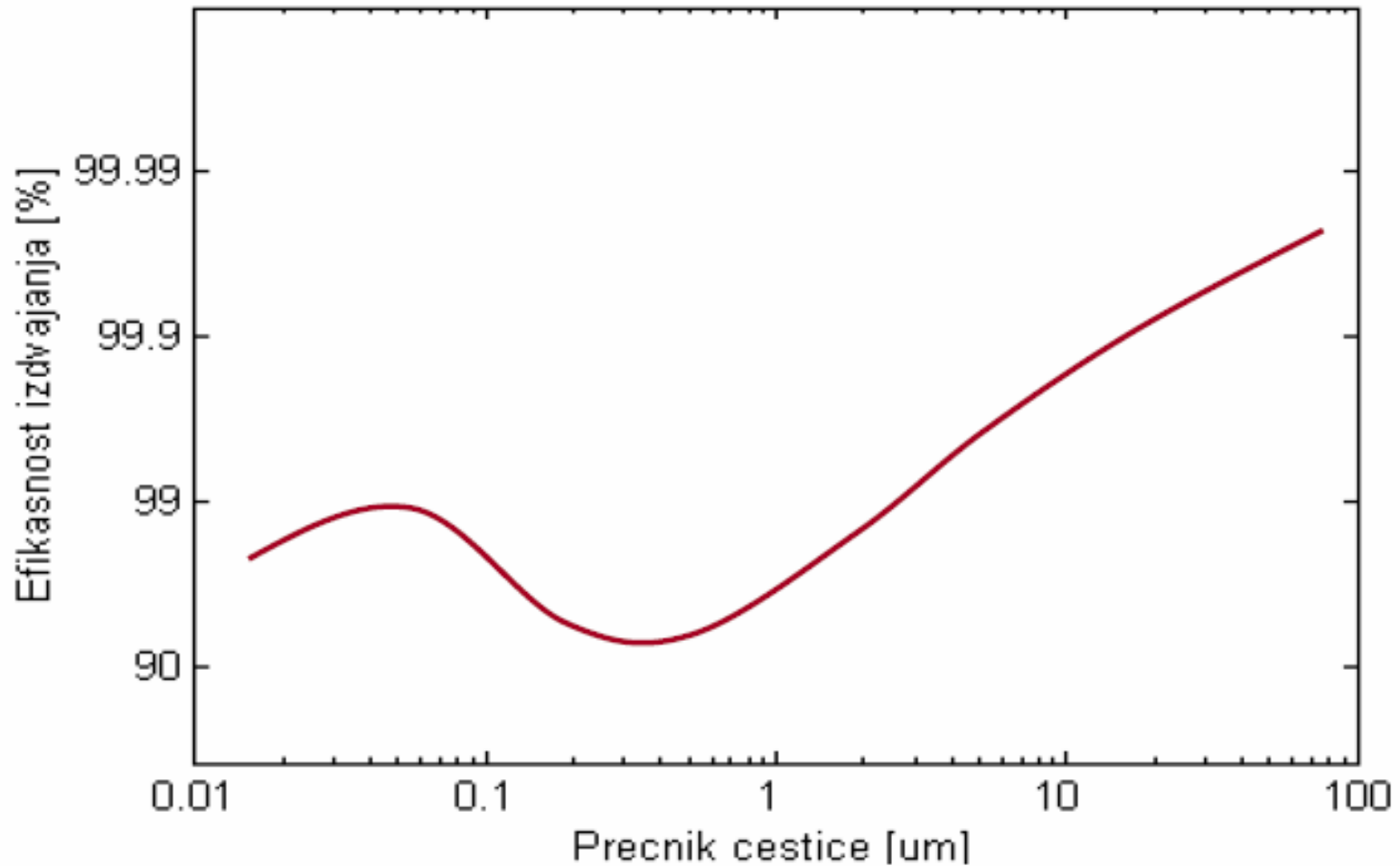
Основни принципи рада: Наелектрисање

Честице $D > 1\mu\text{m} \rightarrow$ ефекат електричног поља

$$n = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon_r + 2} \right) \left(\frac{Ed^2}{4e} \right) \left(\frac{\pi \cdot eZ_i N_i t}{1 + \pi \cdot eZ_i N_i t} \right)$$

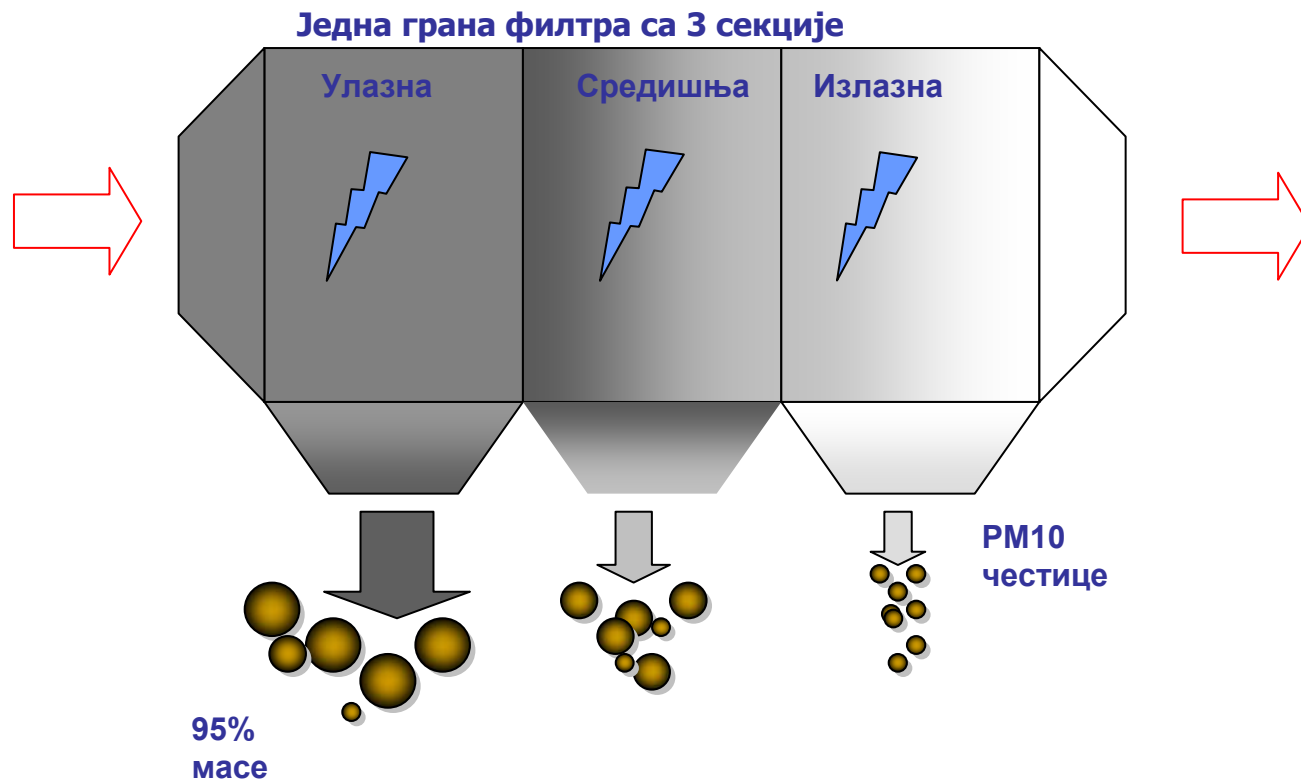
PM10 и веће честице, $Q \approx d^2$

Основни принципи рада: Наелектрисање



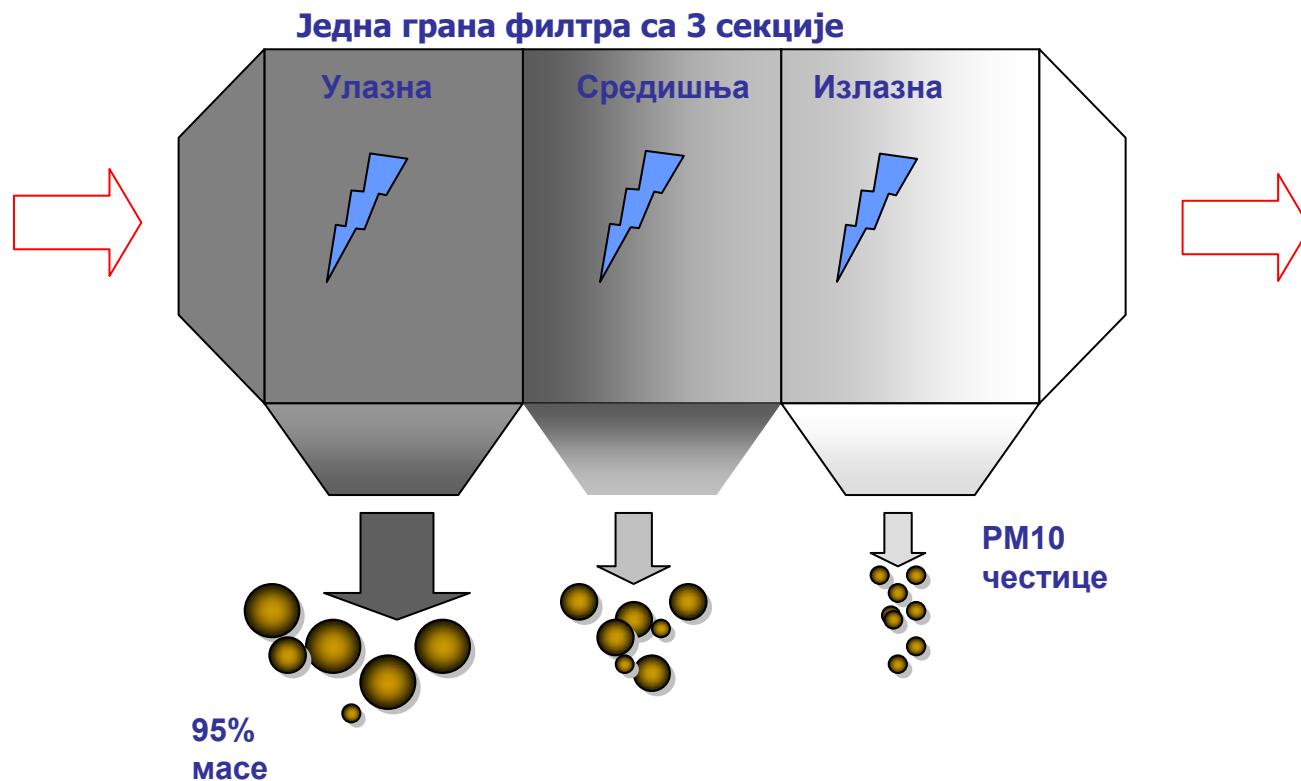
Основни принципи рада

Честице већег пречника се издвајају у оквиру улазне секције. У оквиру улазне секције, издваја се 95% укупне масе летећег пепела. Преостале честице су мањег пречника. БРОЈ преосталих честица је велики, али је њихова маса мала.



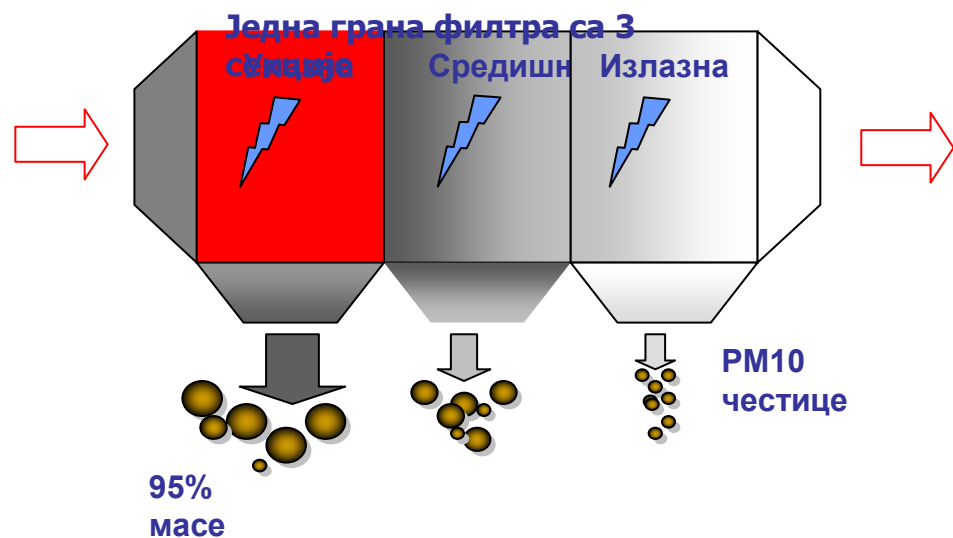
Оптимално напајање различитих ЕСП зона

Улазна, средишња и излазна зона имају различите величине, проводности и масу честица, па захтевају и различито напајање и управљање.



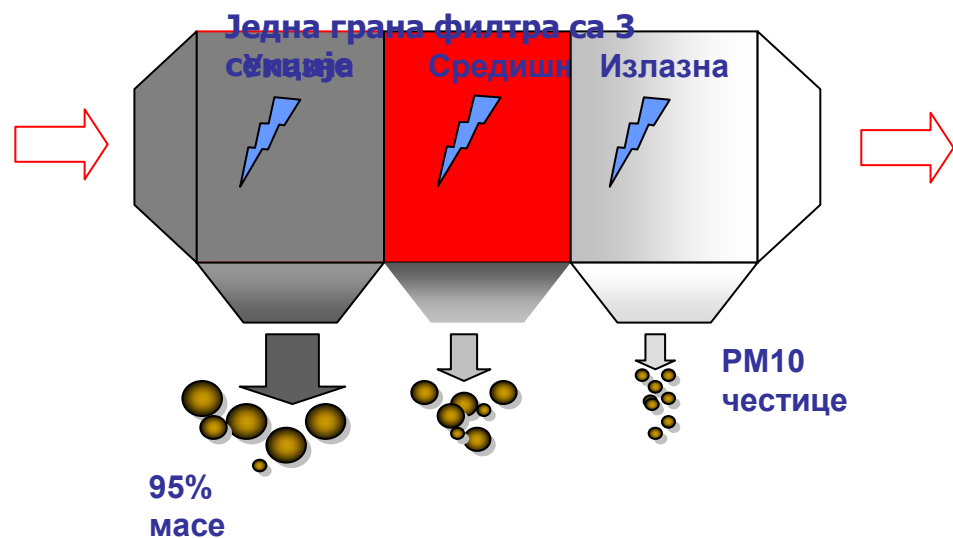
Улазна секција/зона ЕСП

Концентрација и маса честица је веома велика. Код добро подешеног ЕСП, ова зона/секција издваја преко 90% (95%) укупне масе летећег пепела. Пречник честица је релативно велики, отпорност мала, тако да се повратна корона не јавља. Прескоци су чести. **Оптимално напајање је ВФ ВН у континуалном режиму рада.**



Средишња секција/зона ЕСП

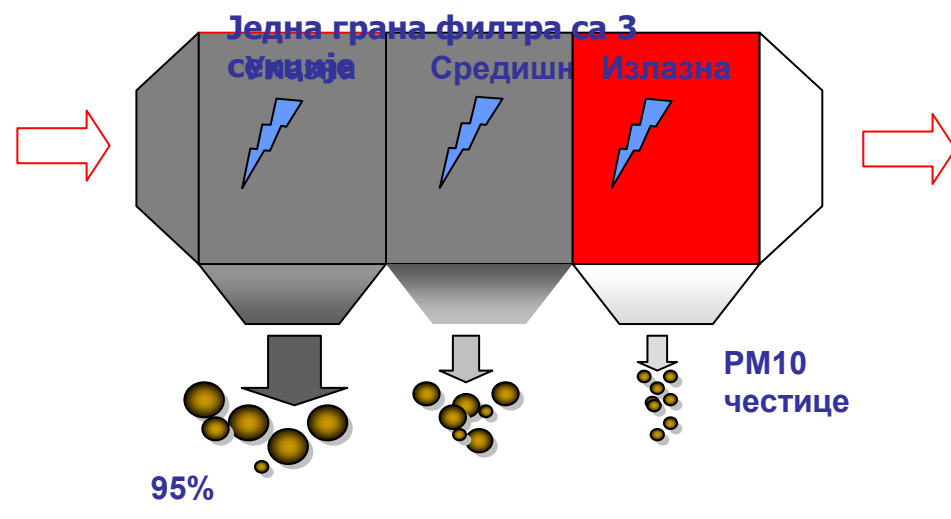
Концентрација честица опада 10 до 20 пута. Више су заступљене РМ10 честице и ултра фине честице. Отпорност је увећана, тако да постоји ризик од повратне короне. **Оптimalно напајање је ВФ ВН у интермитентном режиму рада.** Интермитенција је адаптивна и вођена особинама спектра струје. Емисионе електроде треба да буду адекватног облика, са учесталим отресањем, јер су негативни јони ове зоне/секције одговорне и за издвајање у излазној зони.



Изразна секција/зона ЕСП: повратна корона

Већином се издвајају ултра-фине и PM10 честице. Повратна корона на емисионој електроди умањује стварање негативних јона, повратна корона на таложној електроди ствара позитивне јоне који умањују брзину миграције.

Једновремено, деформације електричног ветра, неуниформно поље и умањење поља у међуелектродном простору значајно умањују издвајање. ВФ ВН напајање је неопходно како би се стварао компактан агломерат пепела и тако смањио повратак у струју гаса. Адаптивна интермитенција је неопходна ради релаксације повратне короне.



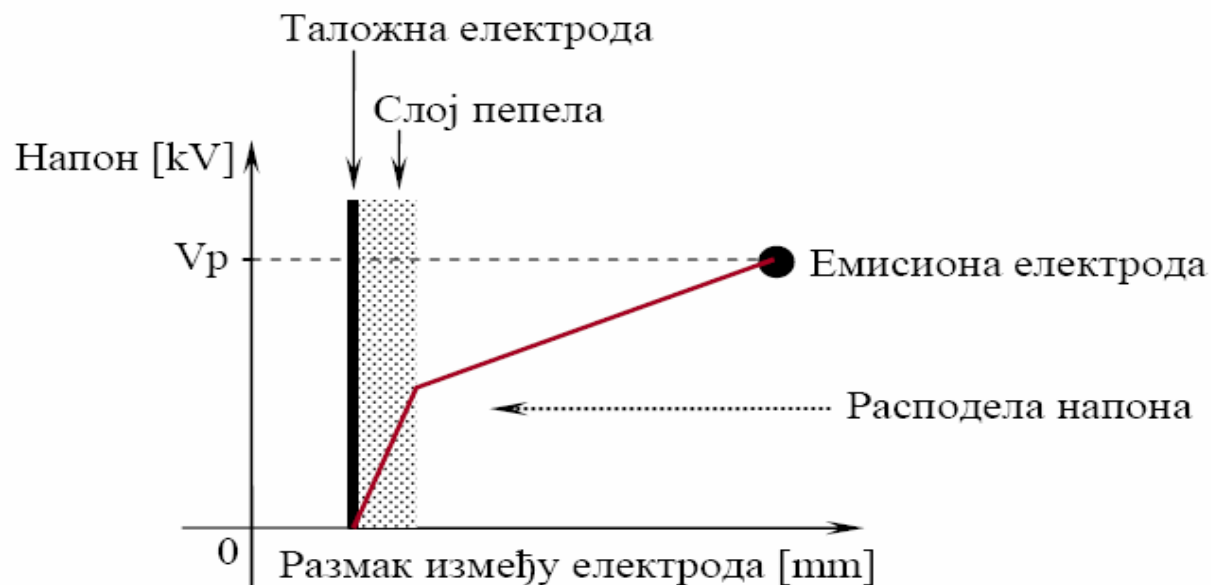
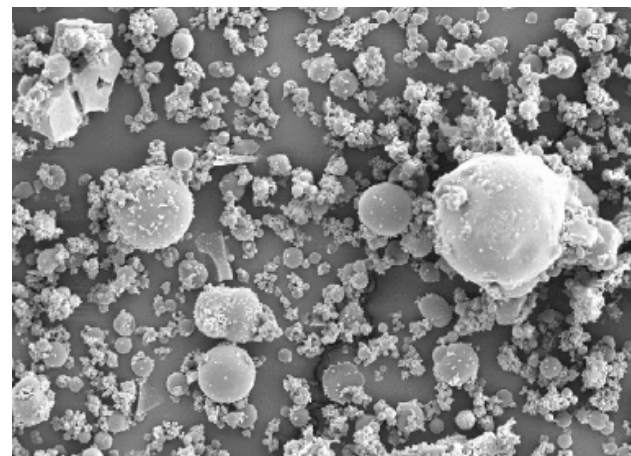
Проблеми:

Повратна корона у излазној секцији

Јачина поља у слоју пепела

2 kV/mm (лабораторија)

800 V/mm (у погону)



Ефекти повратне короне

- Слој пепела од 10mm има пад напона од 8 kV
- Слабо проводан пепео резултује великом јачином поља и великим падом напона
- У излазној секцији се таложе PM10 и ултра фине честице, те је еквивалентна отпорност већа, услед честих прелазака струје из једне у другу честицу
- Радна температура је око 150 °C а тада је отпорност највећа
- На таложној електроди, код пепела средње проводности (око 10^{12}), стварају се кратери са локалним жарењем пепела, јонизацијом и избацивањем материјала у међуелектродни простор. Ефекат: неравномерна расподела поља, струје у простору (електрични ветар), позитивни јони
- На таложној електроди, код пепела веома мале проводности ствара се дистрибуирано жарење и позитивни јони

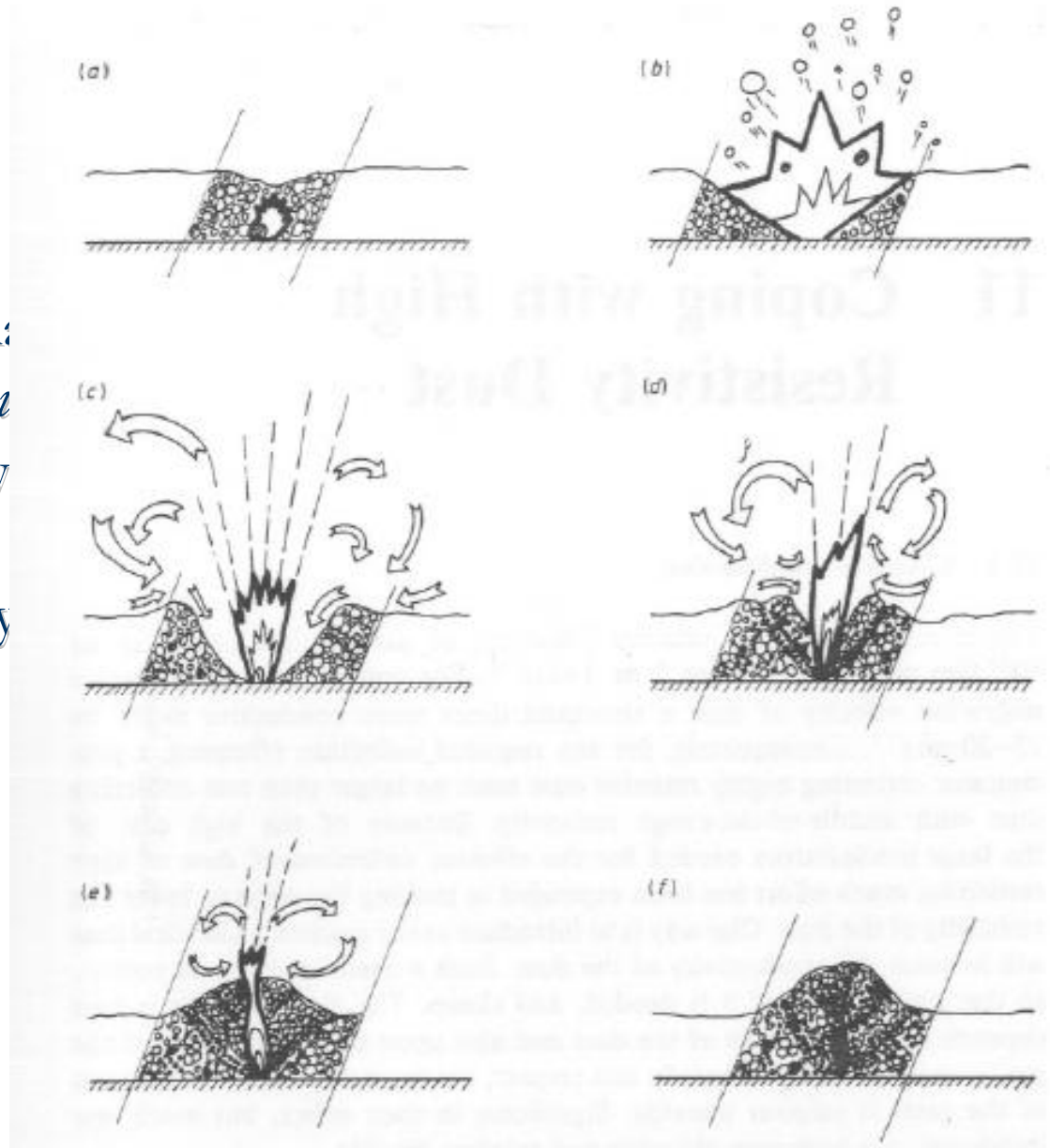
Анализа проблема у ЕСП: повратна корона

Пепео средње проводности

Неравномерна расподела поља и струје, *електрични ветар* усмерен ка кратеру

Позитивни јони смањују брзину миграције честица.

Увећан ризик од варничења, смањен пробојни напон



Анализа проблема у ЕСП: повратна корона

