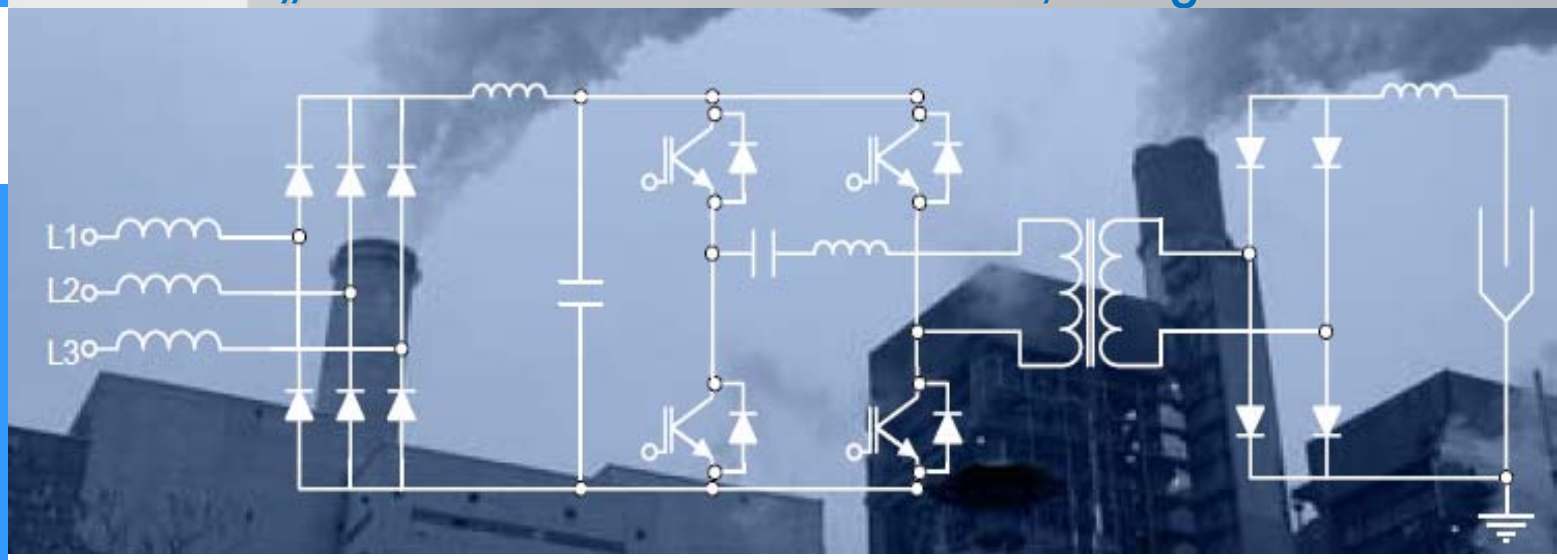
CIKLUS PREDAVANJA NAUČNOG VEĆA INSTITUTA

„MIHAJLO PUPIN“- 07.03.2017, Beograd



PRIMENA ENERGETSKE ELEKTRONIKE U SAVREMENIM METODAMA ELEKTROSTATIČKOG PREČIŠĆAVANJA DIMNIH GASOVA NA TERMOELEKTRANAMA

-Retrospektiva realizovanih projekta i pravci daljeg istraživanja i razvoja

Dr Željko V. Despotović, dipl.el.inž.
Viši naučni saradnik, IEEE senior member
zeljko.despotovic@pupin.rs

SADRŽAJ PREDAVANJA

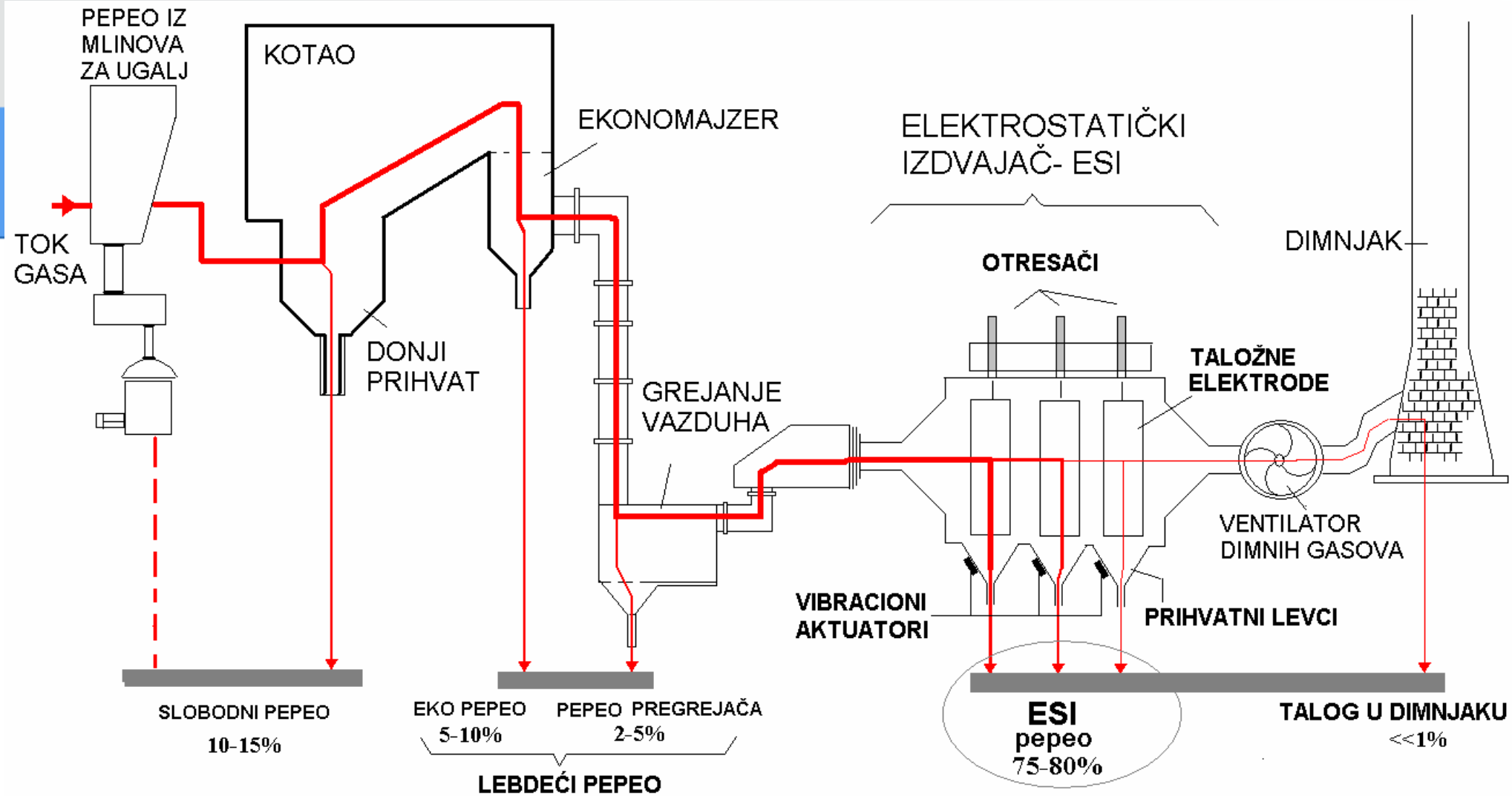
- Rezultati dosadašnjih istraživanja i praktične realizacije viskonaponskih 50Hz-nih i visokofrekventnih pretvarača za efikasno elektrostatičko izdvajanje čestica dimnih gasova na termoelektranama u periodu od 2002-2017godine.
- Trenutno stanje realizovanih postrojenja i stavljanje akcenta na eksploatacione probleme.
- Trendovi u svetu koji se odnose na povećenje energetske efikasnosti postrojenja elektrostatičkih izdvajača upotrebom sofisticiranih algoritama upravljanja sklopovima energetske elektronike.
- Pravci daljeg istraživanja i razvoja kao i buduće perspektive sistemskog upravljanja postrojenjima elektrostatičkih izdvajača.

UVOD

- Elektrostatičko izdvajanje je jedna od najpraktičnijih metoda za izdvajanje čestica ugljene prašine i pepela iz struje dimnih gasova na kotlovskim postrojenjima termoelektrana (TE)
- Izdvajanjem čestica ugljene prašine i pepela se značajno smanjuje negativni uticaj ovih otpadnih materija na ekosistem i zdravlje ljudi.
- Svetske norme, koje su prihvaćene i kod nas, zahtevaju granične vrednosti emisije (GVE) manje od 50mg/m^3, a u nekim zemljama Evrope, manje i od 25mg/m^3.
- Pošto treba očekivati neprekidno smanjenje GVE u bliskoj budućnosti, pravi je trenutak za razvojem 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/m^3 5000mg/m^3 150mg/m^3



Distribucija pepela u procentnom iznosu na jednom tipičnom termoenergetskom postrojenju

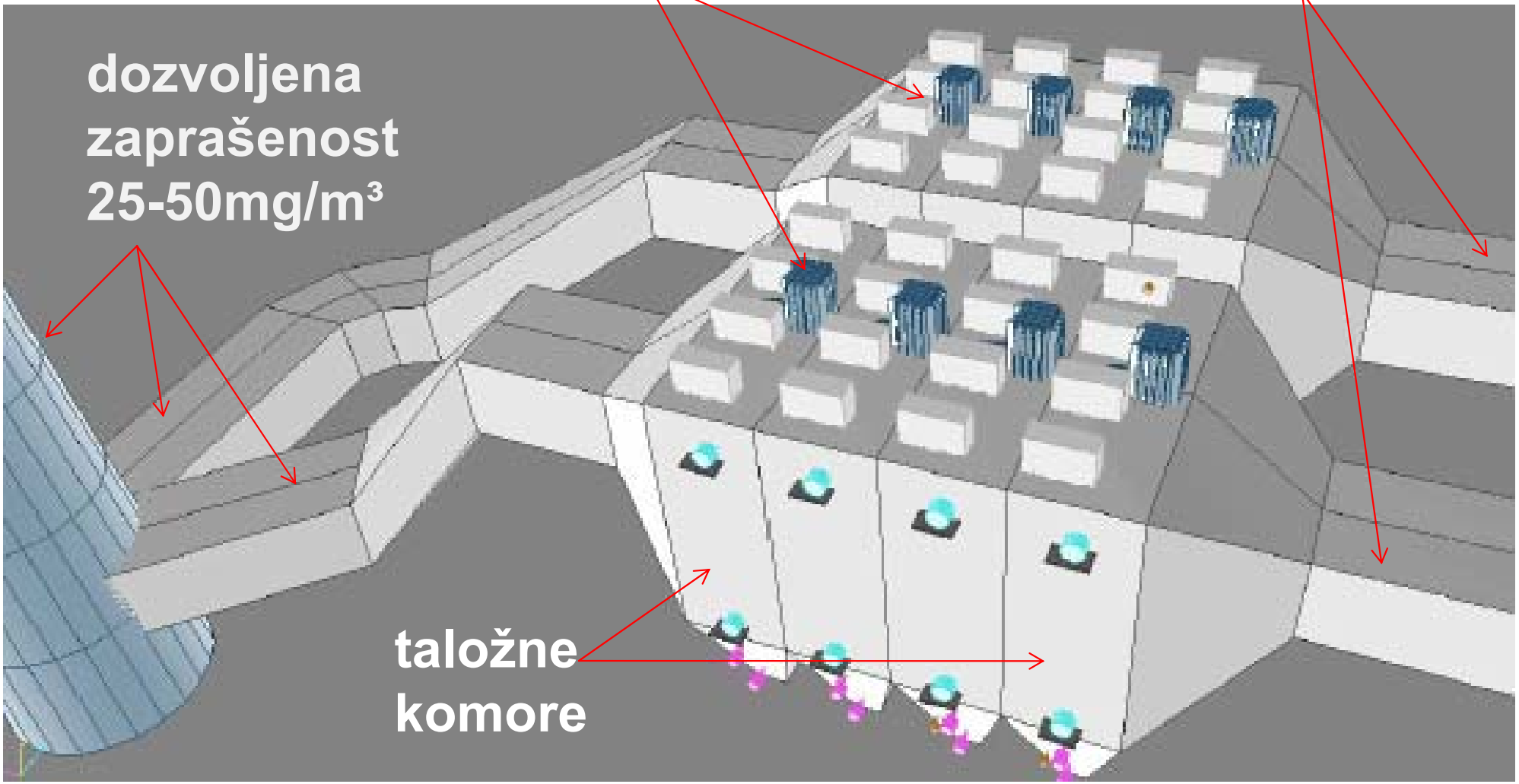
- Najveći deo pepela 75-80%, je lociran u prihvatnim levcima koji se nalaze direktno ispod VN izdvajačkih komora ESI.
- Veoma mali deo pepela (<< 1%) se taloži na dnu izlaznog dimnjaka

institut MIHAJLO PUPIN

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

VN napojne jedinice

zaprašenost na izlazu kotla 30-50g/m³

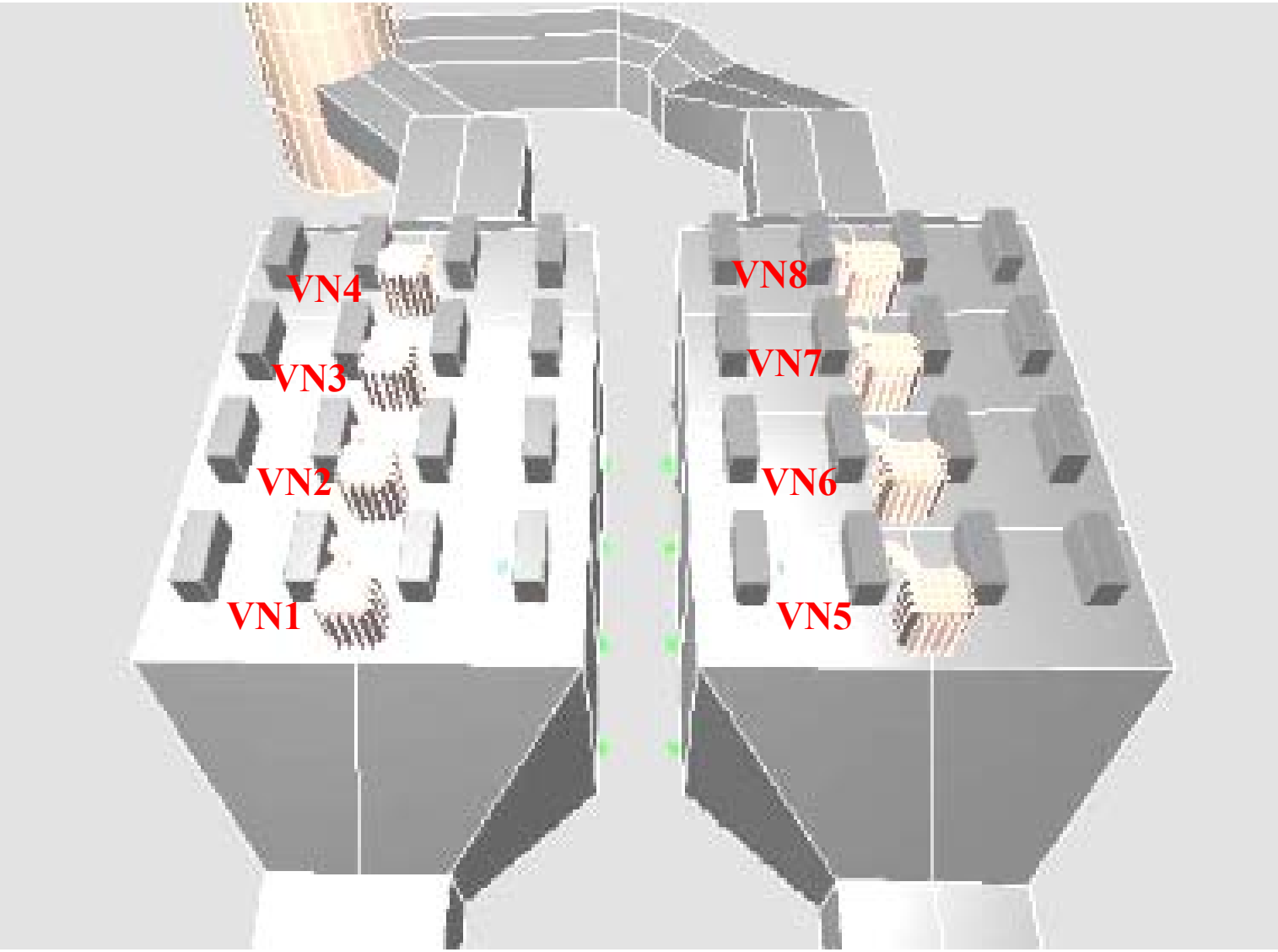


TIPIČNO POSTROJENJE ELEKTROSTATIČKIH IZDVAJAČA (ESI)

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

institut MIHAJLO PUPIN

Energetski zahtevi za ESI postrojenjem



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

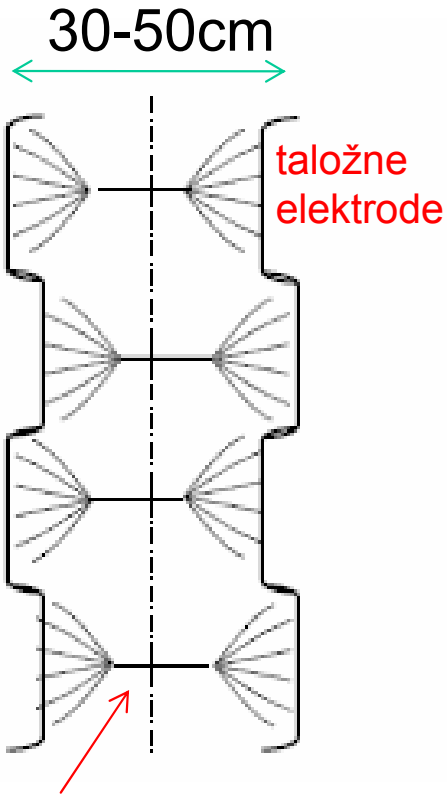
-taložne komore 100kV DC /1A 100kW

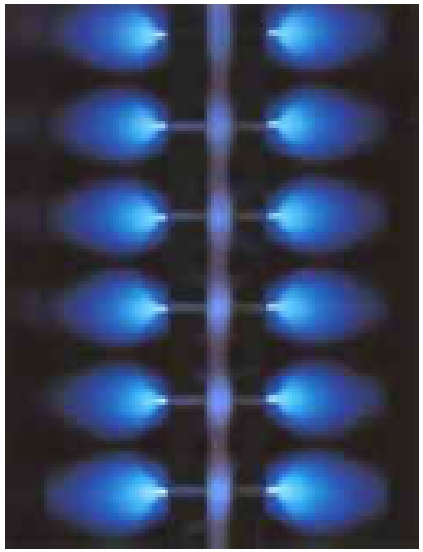
-ulazno napajanje 3x400V, 50Hz 120-130kVA

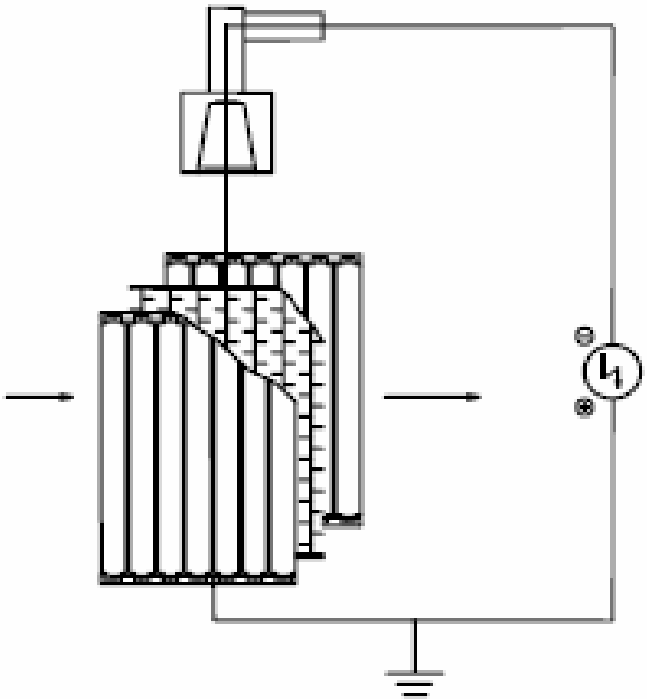
-8 VN jedinica troši iz napojne mreže ukupnu prividnu snagu ≈ 1 MVA

institut MIHAJLO PUPIN

Princip elektrostatičkog izdvajanja

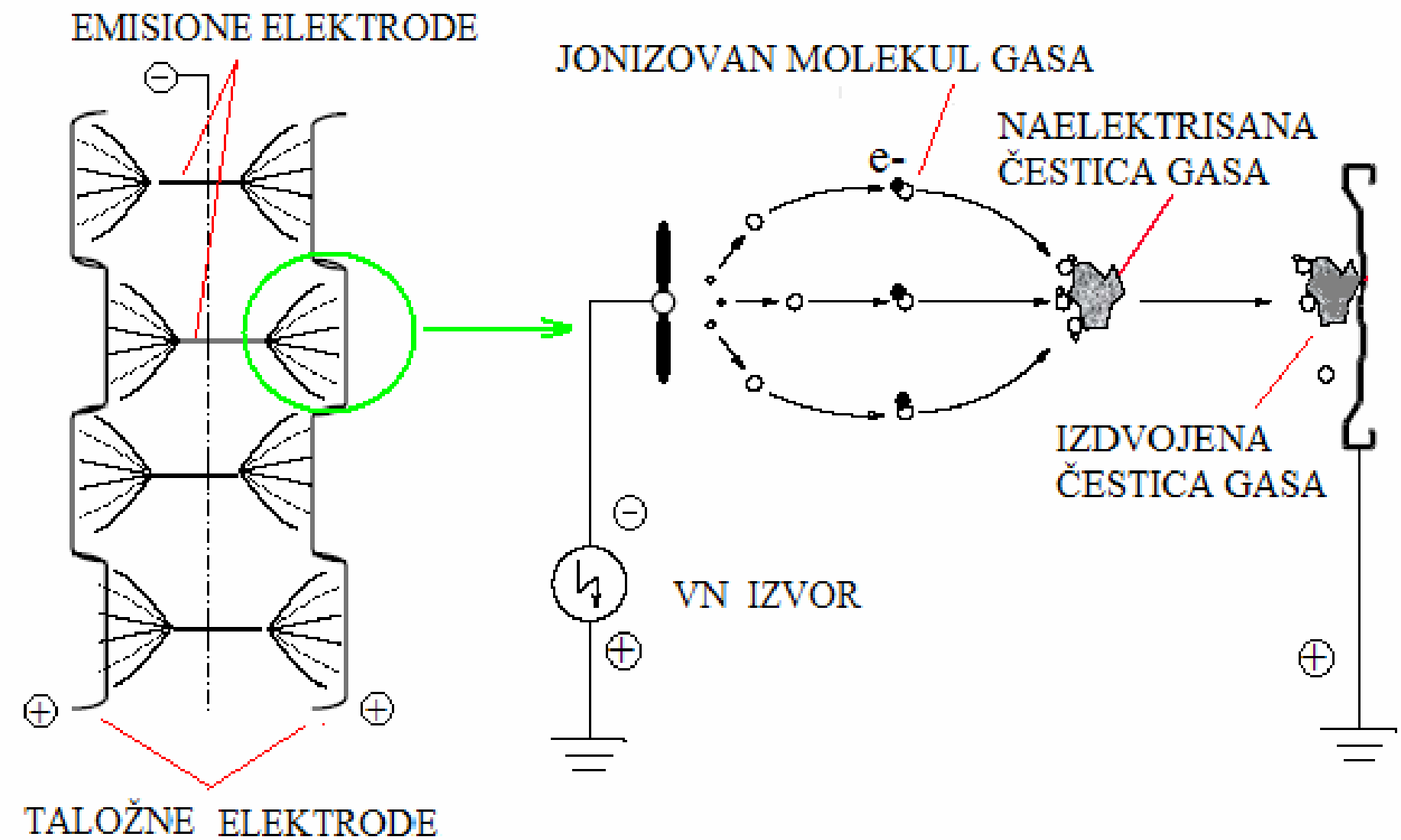




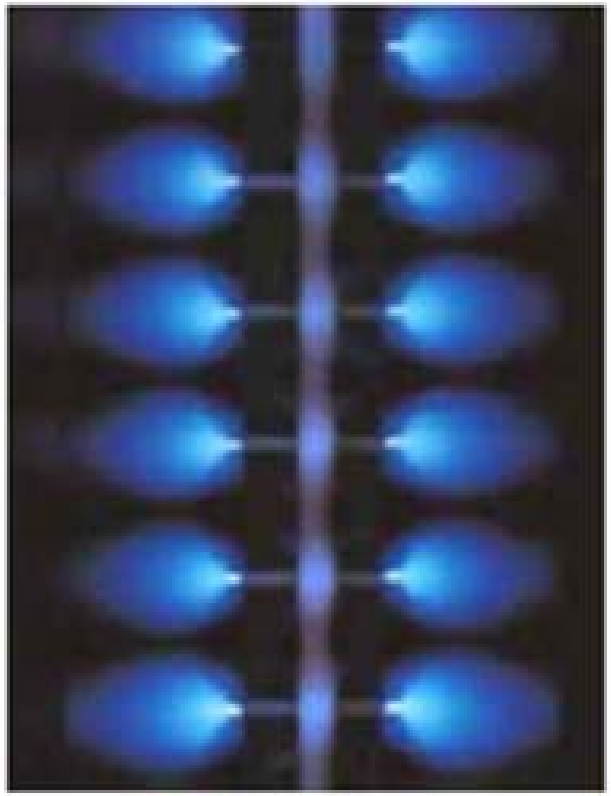


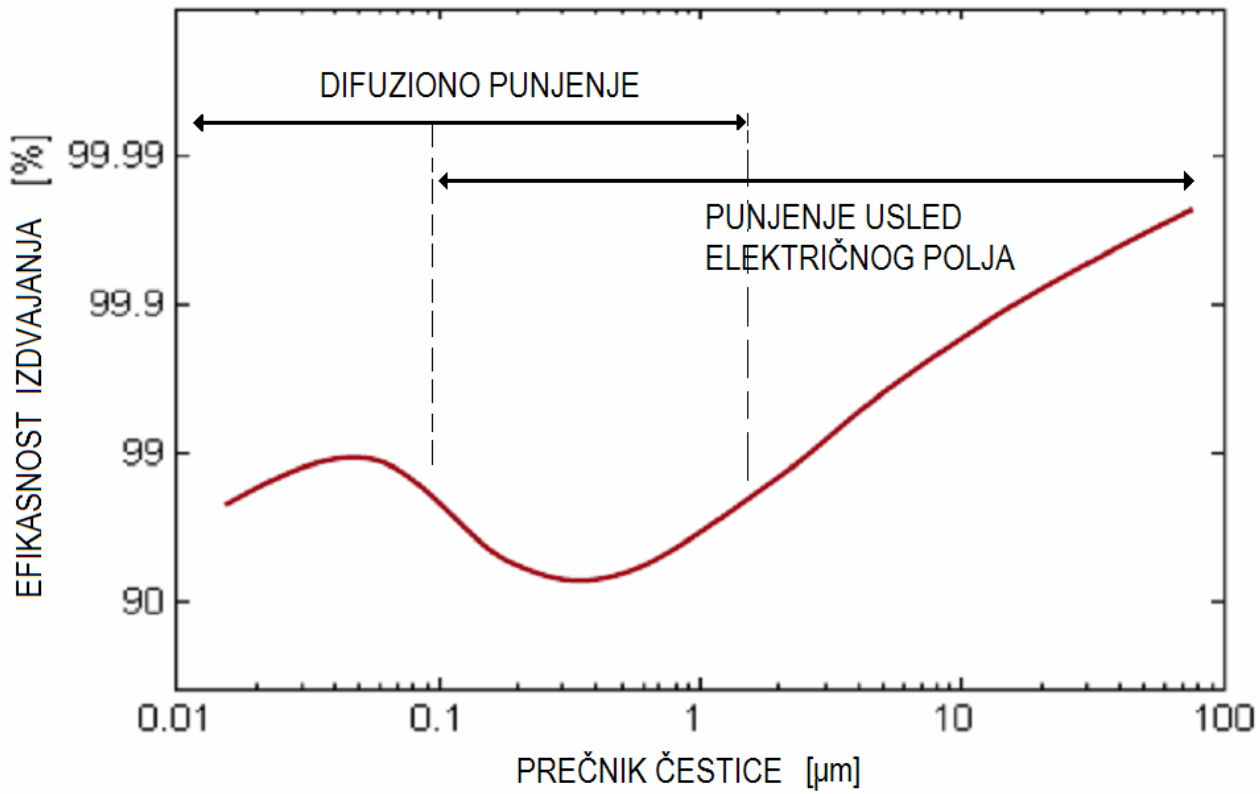
- Emisione elektrode se dovode na negativan napon -50kV…-100kV
- Korona stvara negativne jone, čestice dimnog gasa se naelektrisavaju difuzijom i električnim poljem
- Električno polje potiskuje naelektrisane čestice ka uzemljenoj taložnoj elektrodi migracionom brzinom 10-20cm/s

Izgled taložne komore ESI i mehanizam naelektrisvanja čestica



Efikasnost izdvajanja u funkciji prečnika čestice



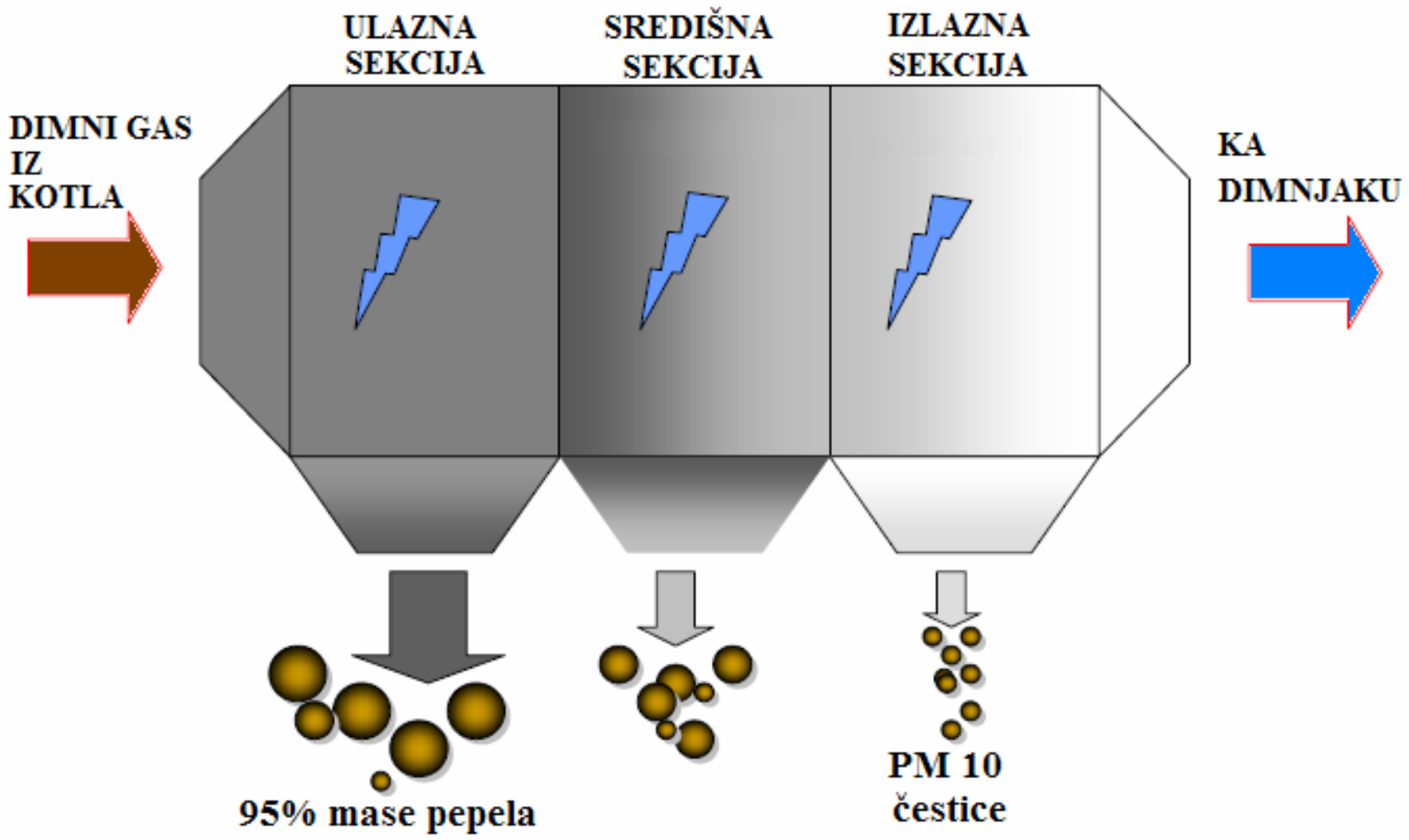


Ultra fine čestice (prečnika D<1μm) se naelektrisavaju difuzijom, dok se PM čestice i krupnije (D>1μm) naelektrisavaju efektom polja.

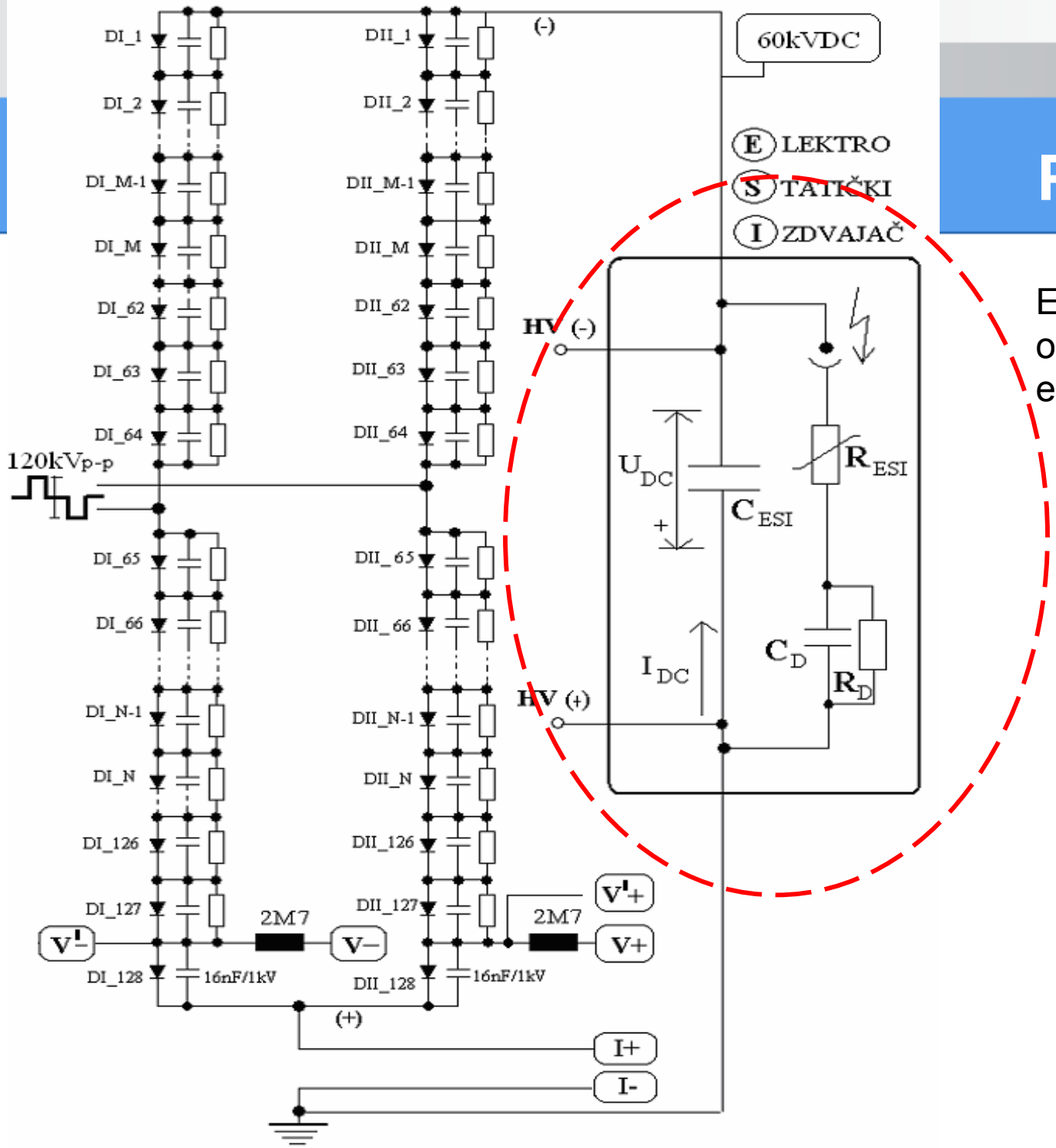
Difuziono punjenje je zbog sporijeg (linearnog) rasta naelektrisanja sa veličinom čestice dominantno pri malim prečnicima čestica, najčešće ispod 1 μm (tipično 0.1 μm), dok je punjenje čestica poljem dominantno za čestice veće od 1 μm. U oblasti između, oba mehanizma su izražena, pa je efikasnost izdvajanja tih čestica najmanja

institut MIHAJLO PUPIN

IZGLED TROSEKCIJSKOG IZDVAJAČA



PARAMETRI *ESI*



ESI je dominatno kapacitivno optrećenje-preovladava kapacitet elektrodnog sistema

Kada se ostvari preskok, u „igru“ se uključuje i paralelna nelinearna otpornost.

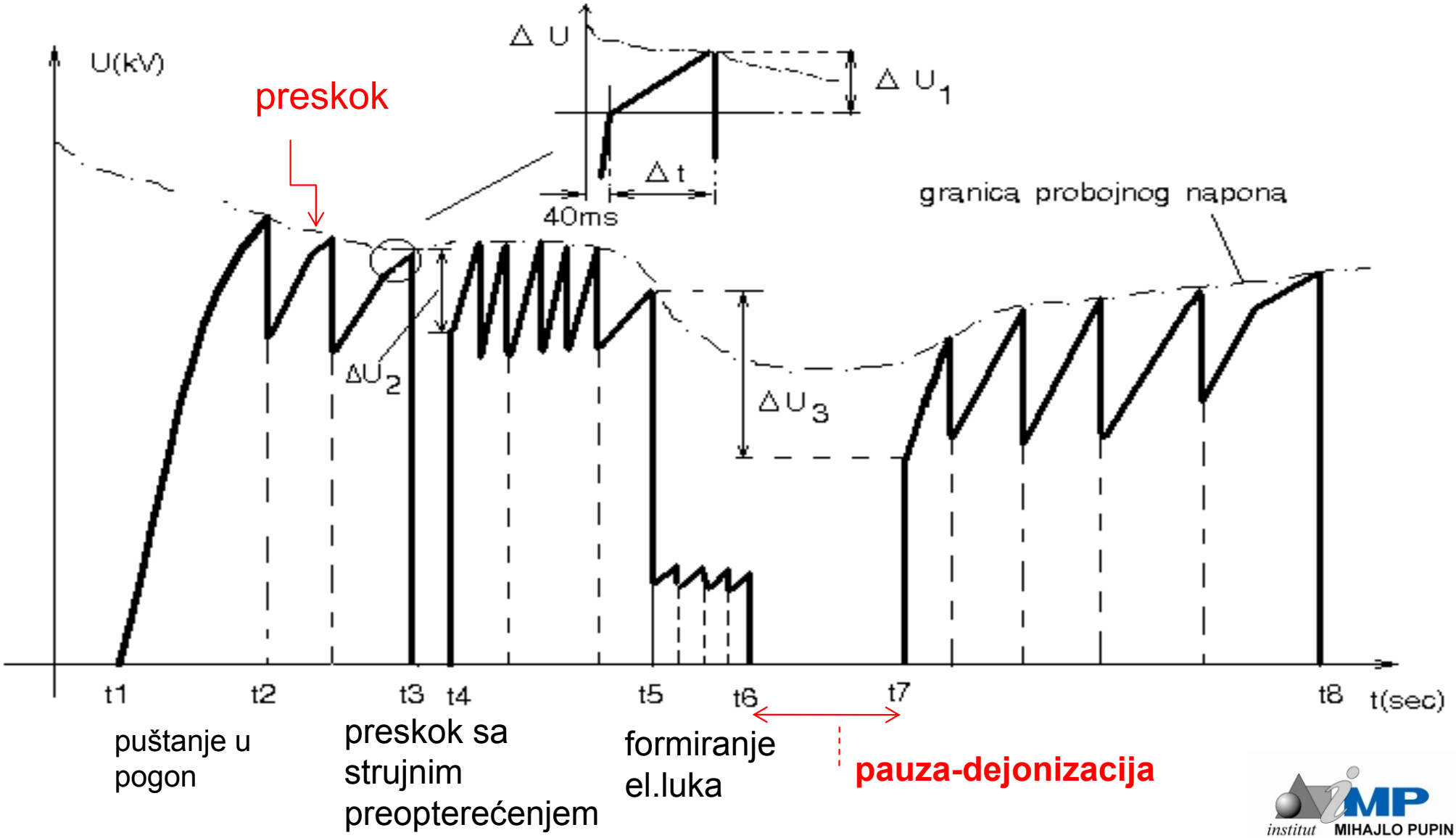
Tipične vrednosti za 100kV filtar :

R_{ESI}=40k-100k

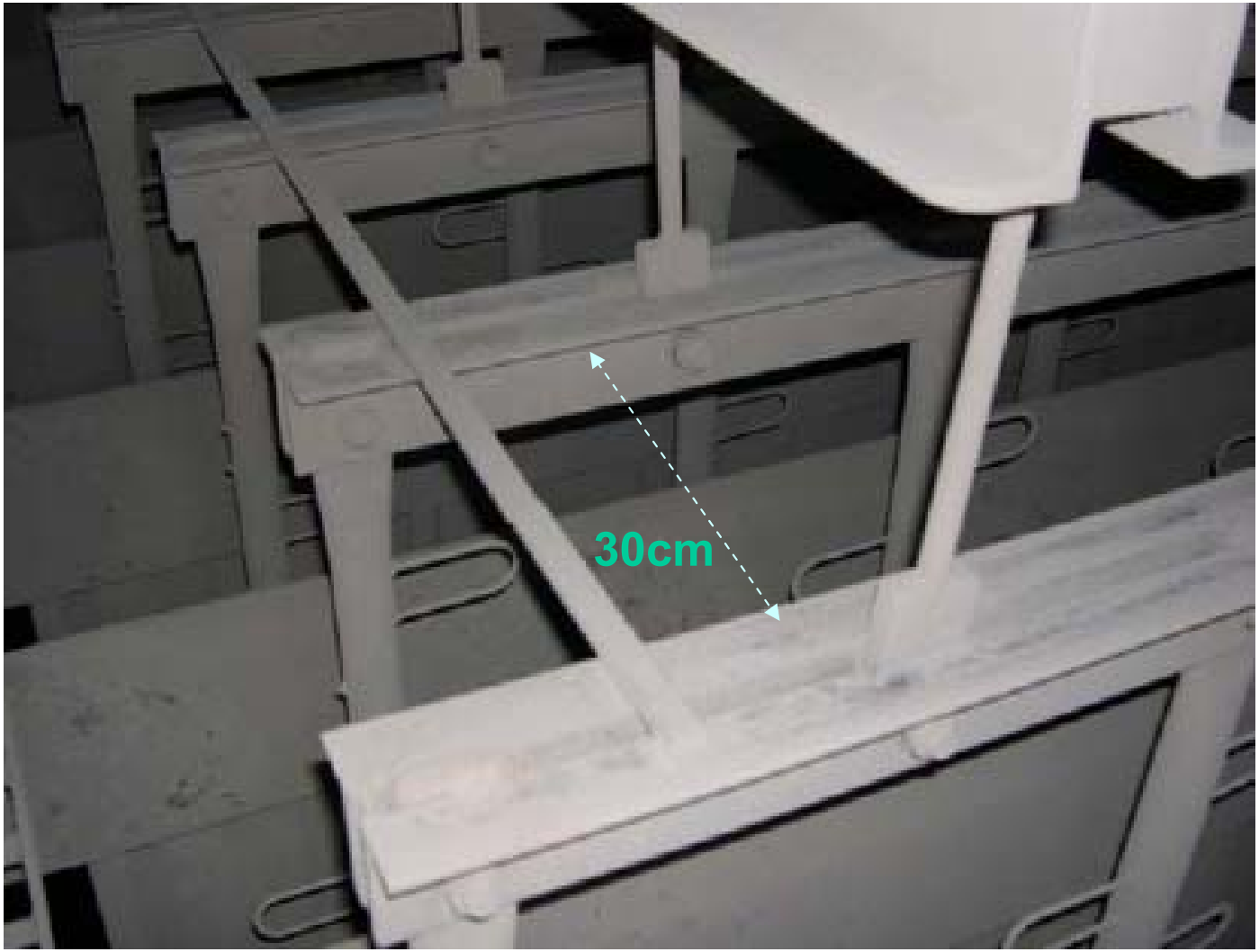
C_{ESI}= 20-40nF

institut MIHAJLO PUPIN

Karakteristična vremenska promena napona ESI tokom jednog ciklusa izdvajanja



Sistem taložnih elektroda (realni snimak na postrojenju)

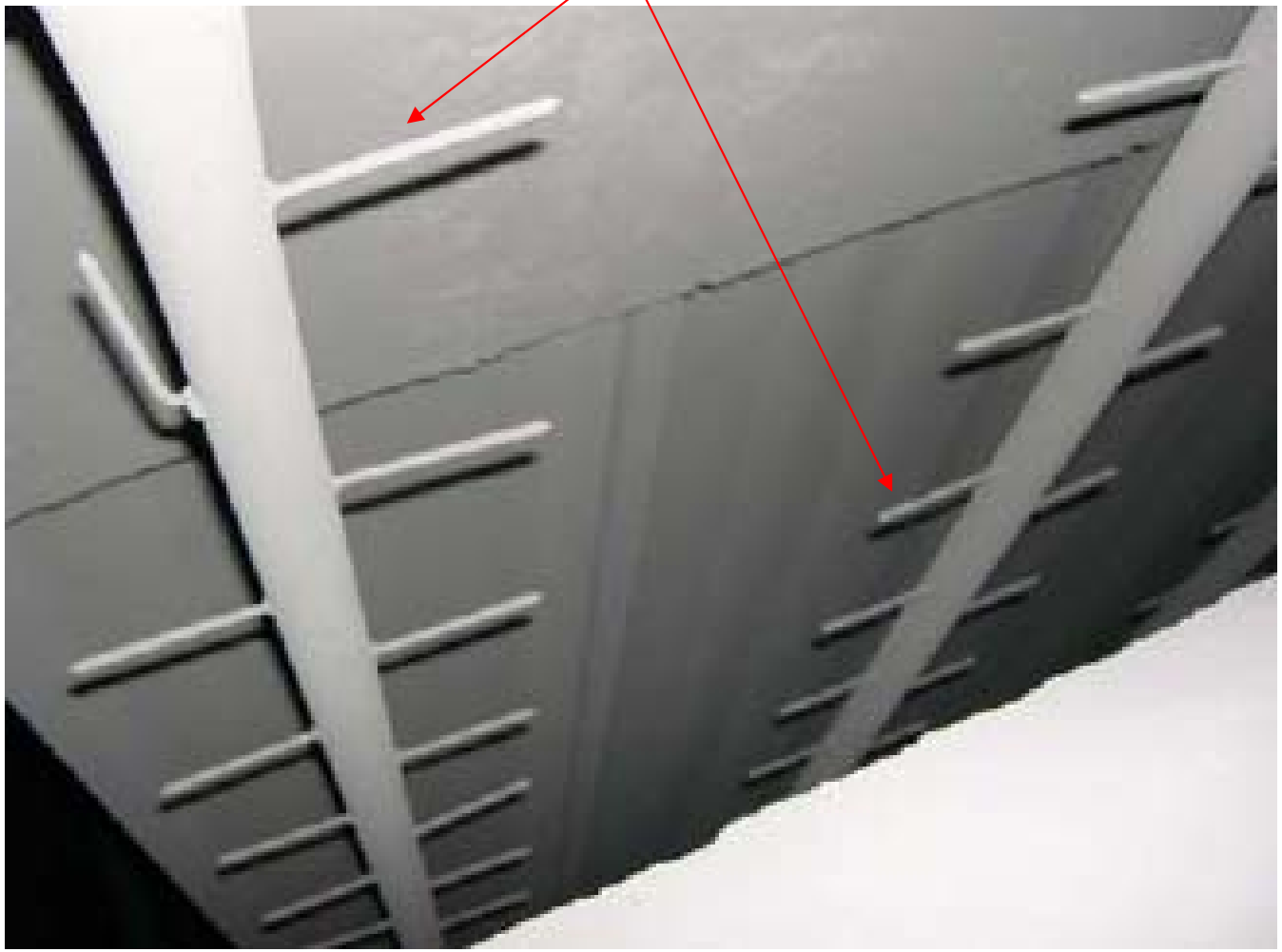


Ukupna površina:
20.000-60.000 m²
TIPIČNO: 40.000m²

Rastojanje: 20-40cm
TIPIČNO: 30cm

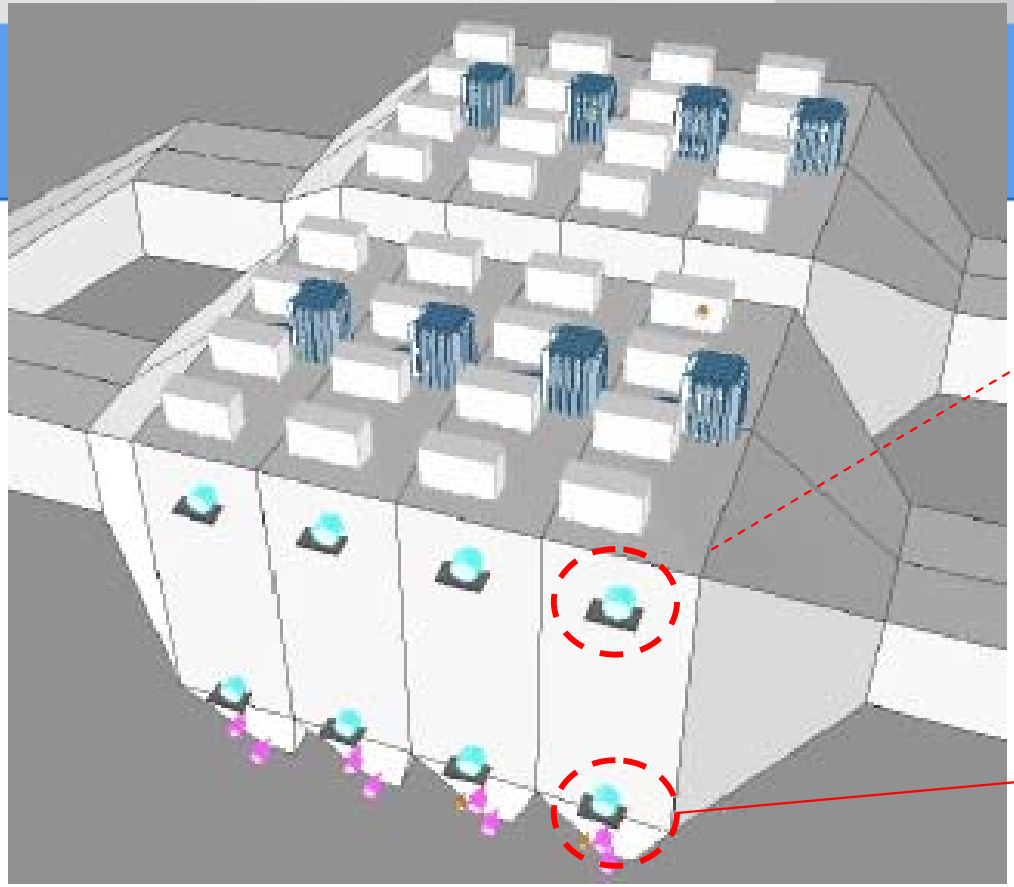
institut MIHAJLO PUPIN

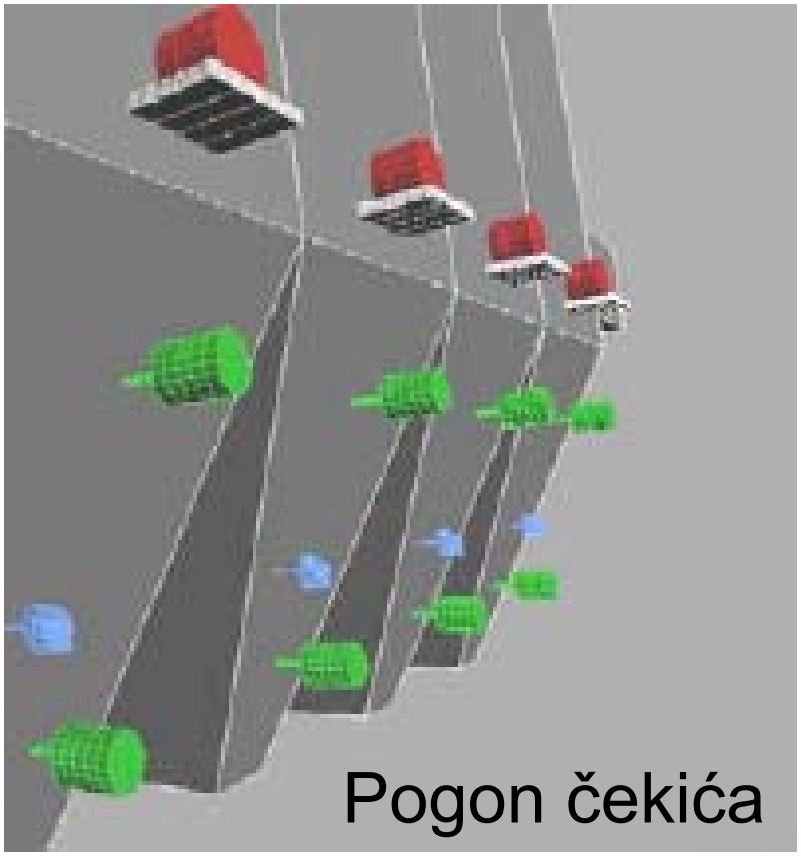
Sistem emisionih elektroda (realni snimak na postrojenju)



-Ovaj sistem odlučujuće utiče na koronu

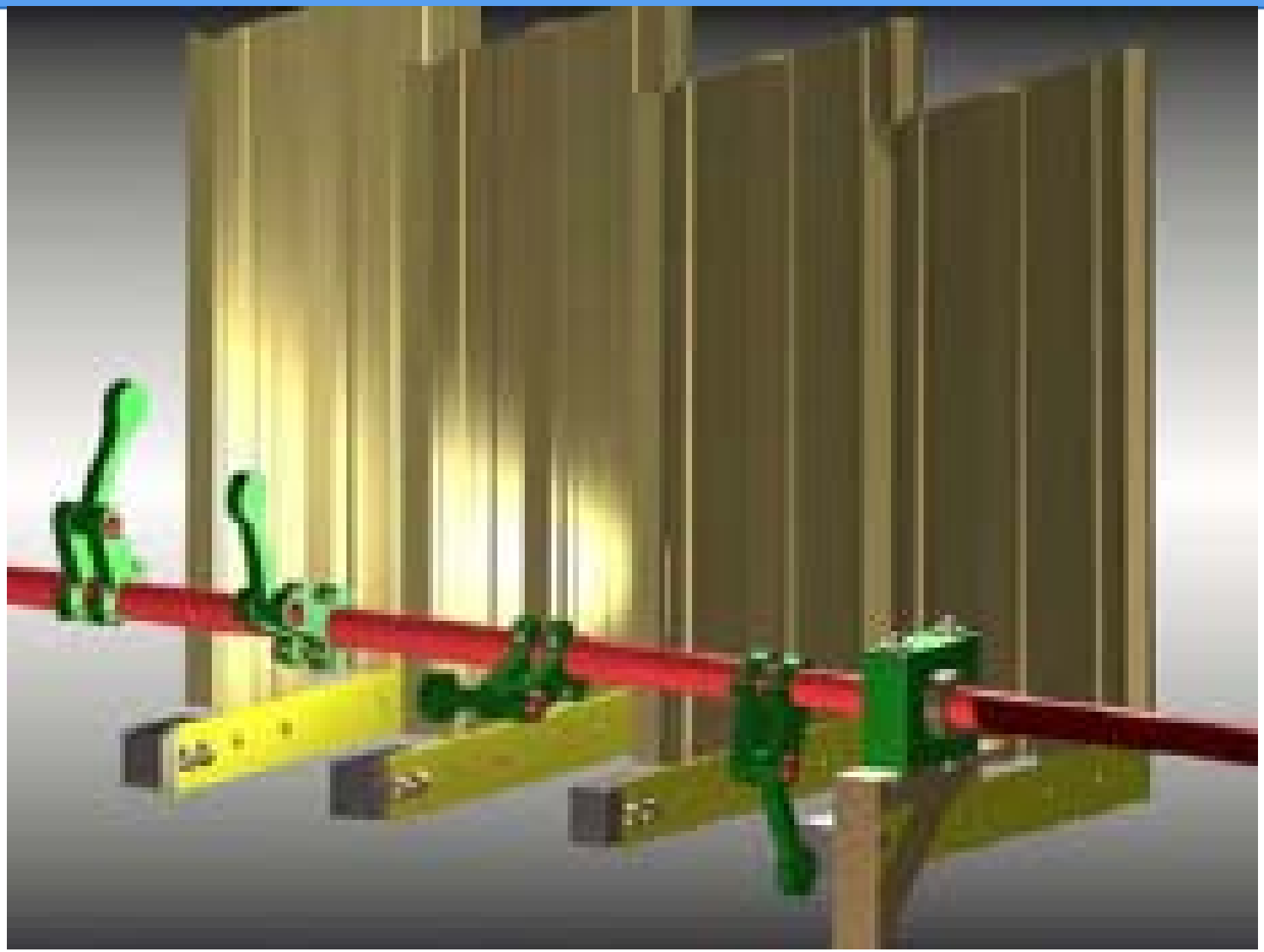
-Mali poluprečnik krivine na ivicama uvećava polje





SISTEM POGONA OTRESAČA

UDARNI SISTEM (rotirajući čekići) za OTRESANJE



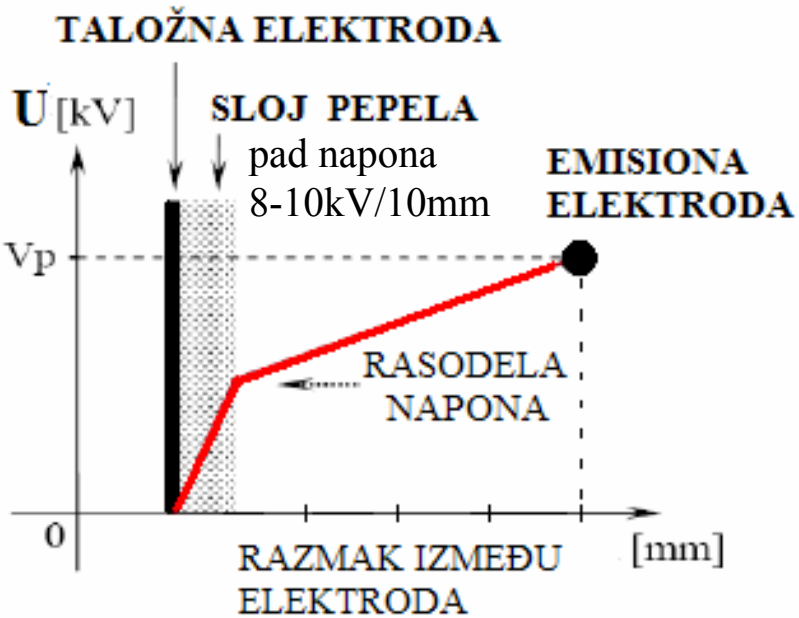
Sistem otresanja je veoma bitan sa stanovišta povratne korone

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

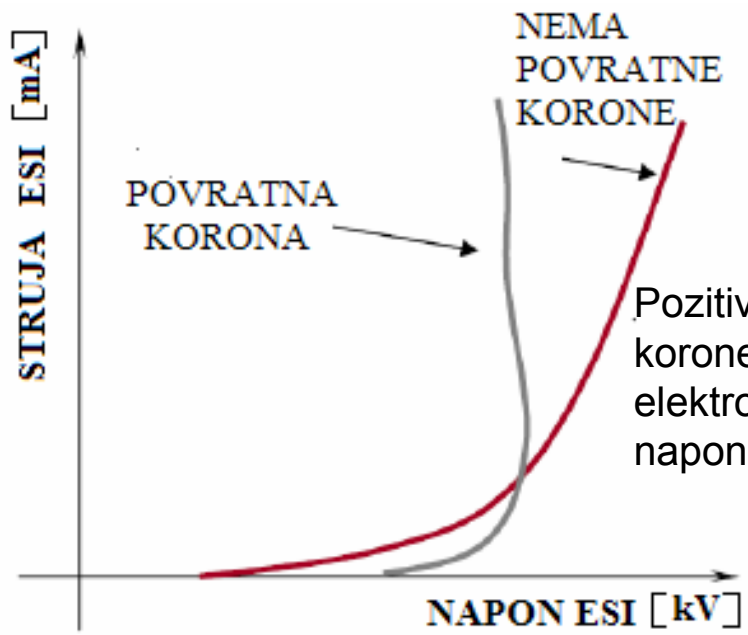
POVRATNA KORONA?

institut MIHAJLO PUPIN

Efekat povratne korone u taložnoj komori



raspodela potencijala,



Pozitivni joni usled povratne korone na taložnim elektrodama smanjuju probojni napon

I-V karakteristika

Usled dugotrajnog izdvajanja čestica dimnog gasa na taložnim elektrodama se formira sloj pepela, koji kada dostigne odgovarajuću debljinu, nepovoljno utiče na dalje izdvajanje. Ključni efekat koje se pri tome javlja je **povratna korona**, koja postaje dominantna pogotovu kada se radi o slabo ili srednje provodnom pepelu (specifična provodnost oko $10^{12}\Omega m$)

institut MIHAJLO PUPIN

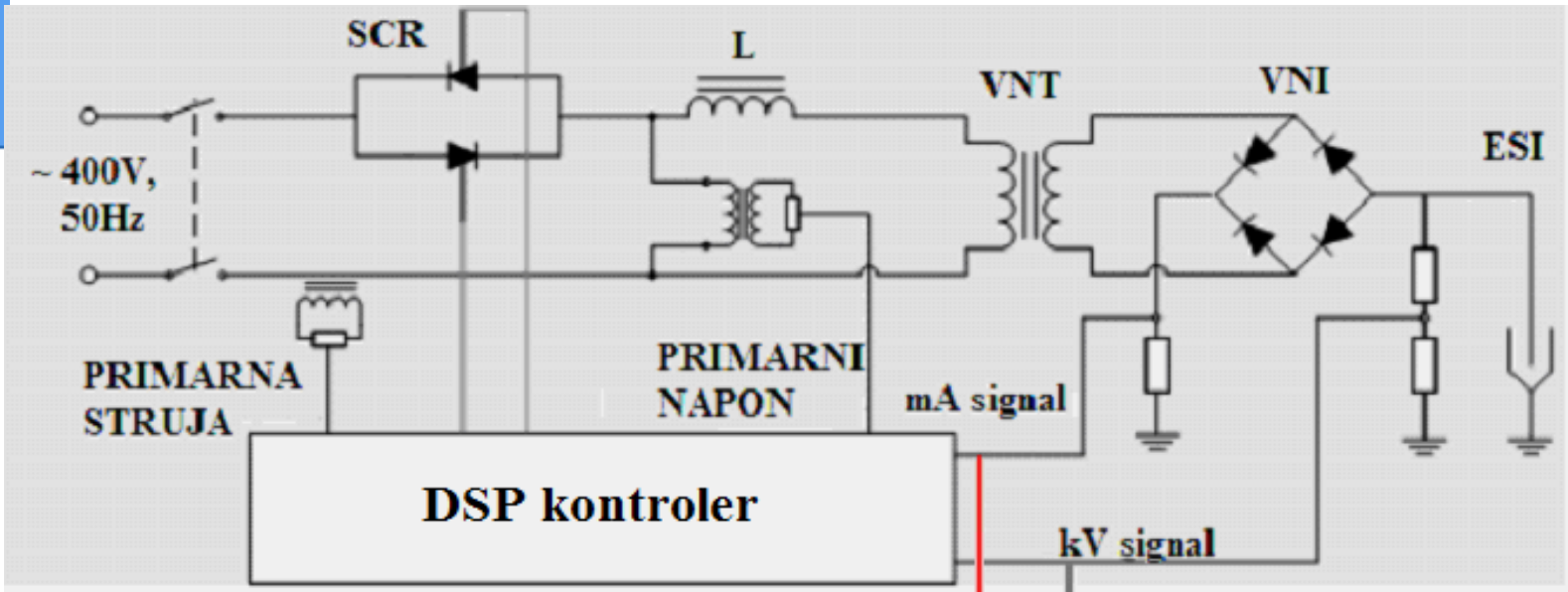
Negativni efekti povratne korone

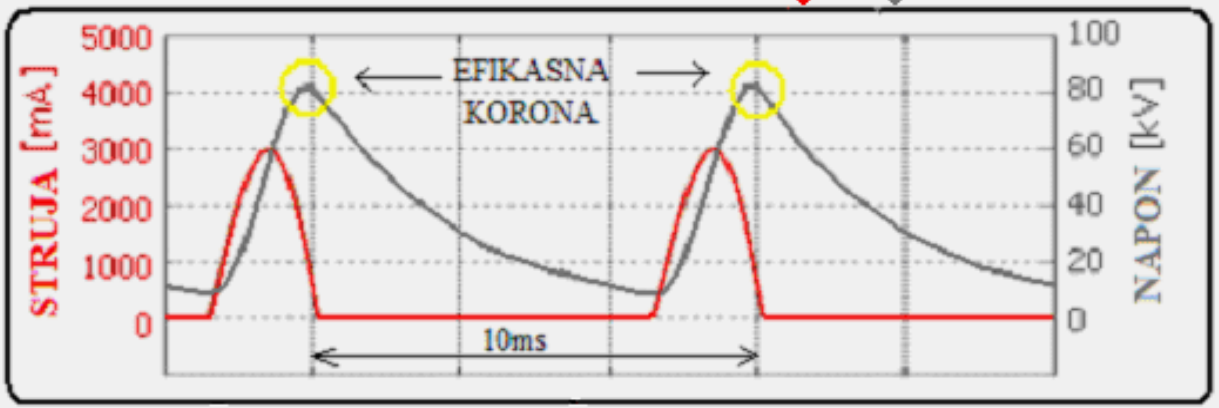
- Na taložnoj elektrodi kod pepela srednje provodnosti (oko $10^{12}\Omega m$) stvaraju se udubljenja (tzv. krateri) sa lokalnim žarenjem pepela, jonizacijom i izbacivanje materijala u među elektrodni prostor.
- Pozitivni joni na taložnim elektrodama smanjuju probojni napon. Posledica ovoga je smanjenje 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 umanjenje 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.
- 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. bez naponske 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 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).

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.

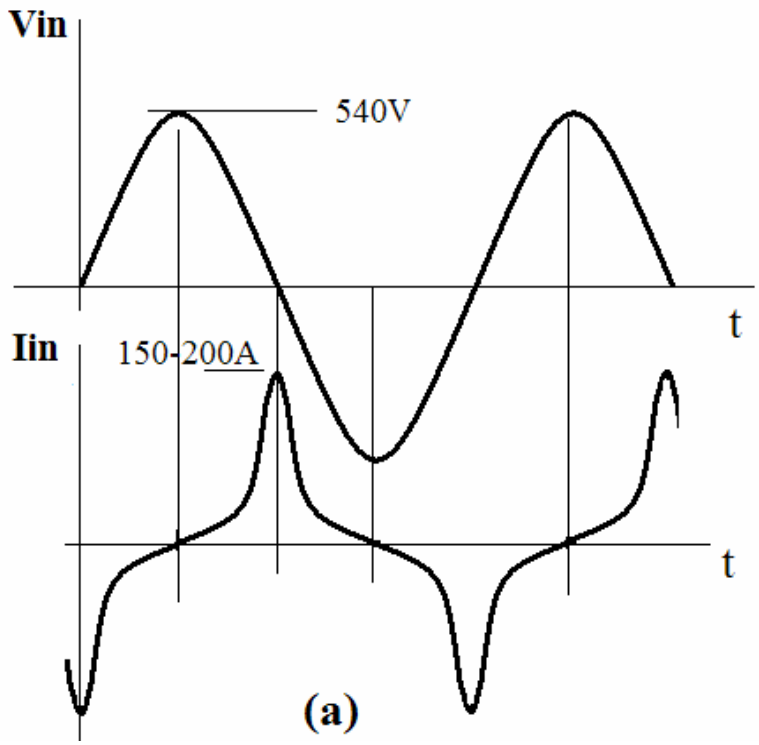
institut MIHAJLO PUPIN

PROBLEMI KOD 50Hz-nog NAPAJANJA

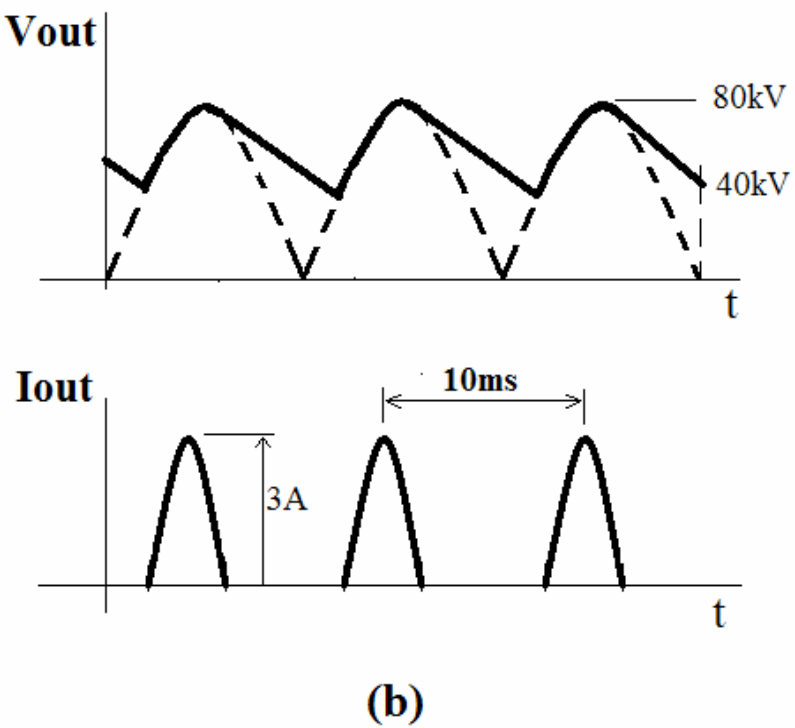
- Kod uspostavljanja luka struja se ne može prekinuti tokom jedne mrežne poluperiode, do komutacije tiristora
- Ograničenje u korišćenju efikasne korone
- Velika energija luka degradira kako taložne tako i emisione elektrode
- Loš faktor oblika linijske struje
- Velika reaktivna te stoga i prividna snaga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

Problemi koji smanjuju energetsku 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.

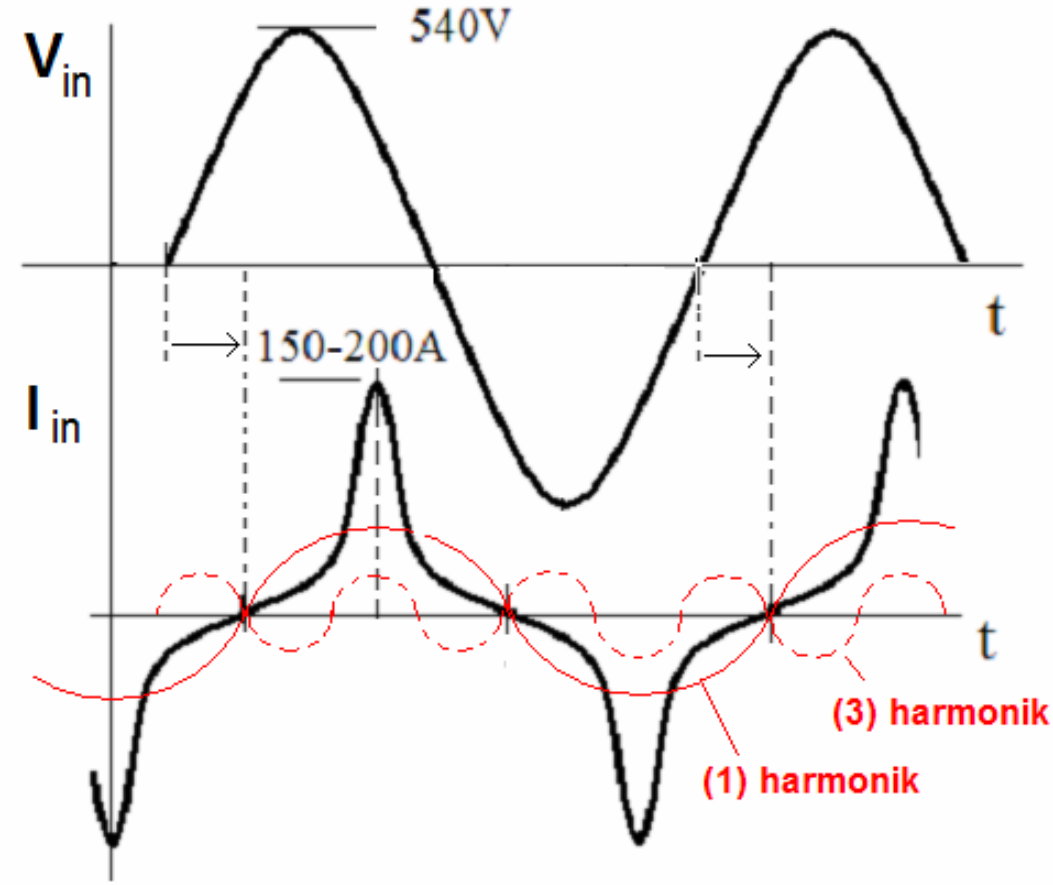


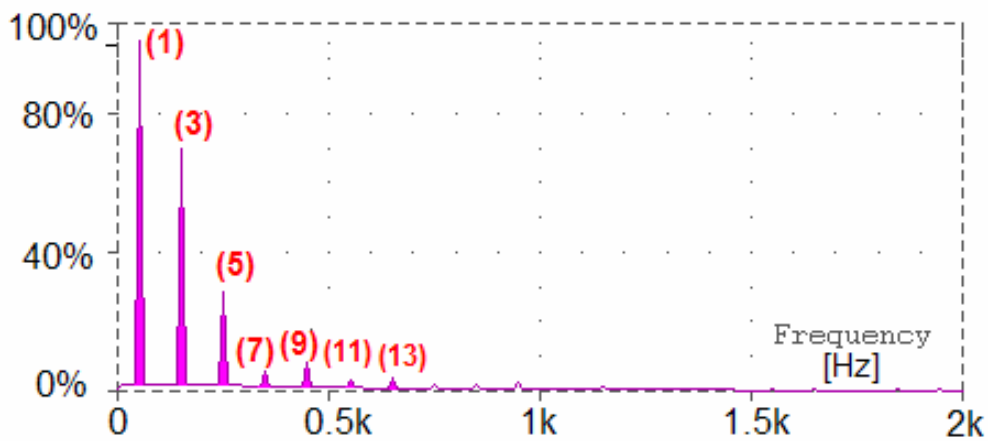
Ulazni mrežni napon i struja



Izlazni mrežni napon i struja

institut MIHAJLO PUPIN





- 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.

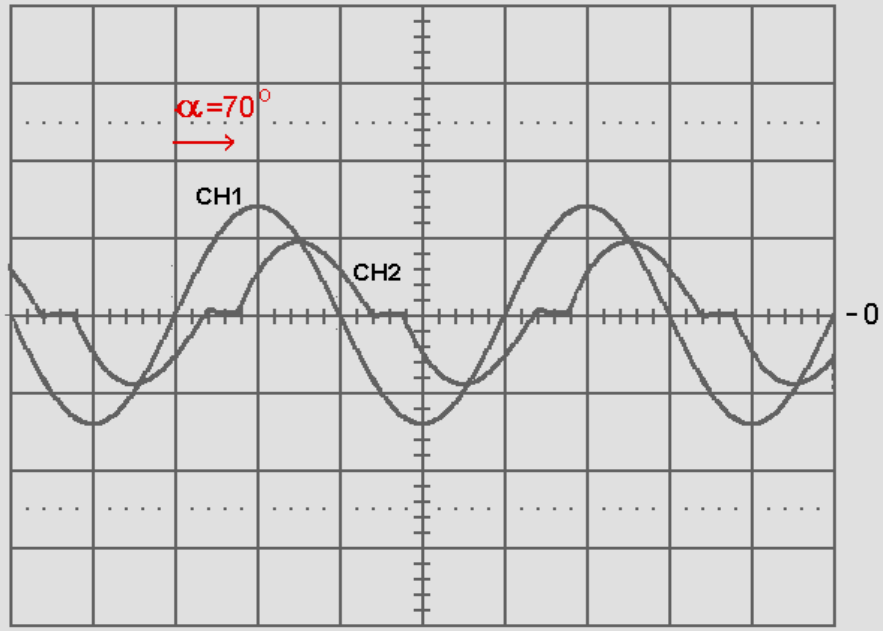
- Sve komponente struje, osim aktivne, dovode do nepotrebnog povećanja efektivne vrednosti struje koja se uzima iz mreže.

- 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 $\cos\varphi < 0.65$!!!

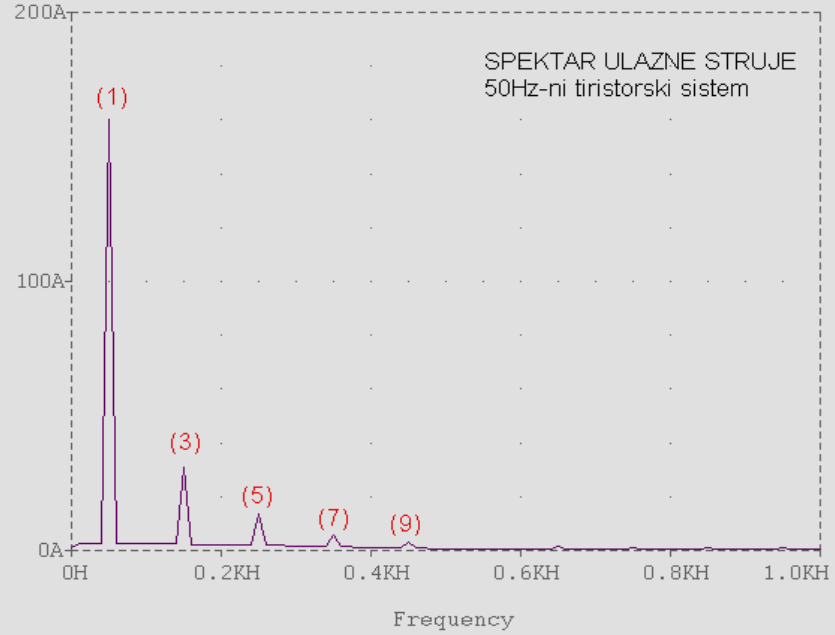
Ukupni faktor snage, koji obuhvata uticaj i viših harmonika, $\lambda = P/S < 0.5$!!!

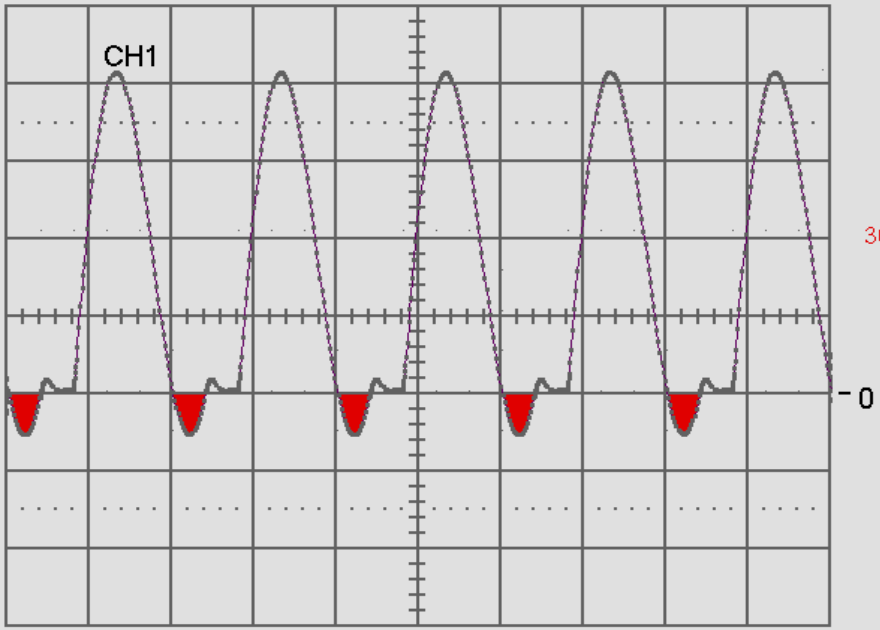
Realni talasni oblici i spektri za 50Hz-ni sistem (fazni ugao 70°)



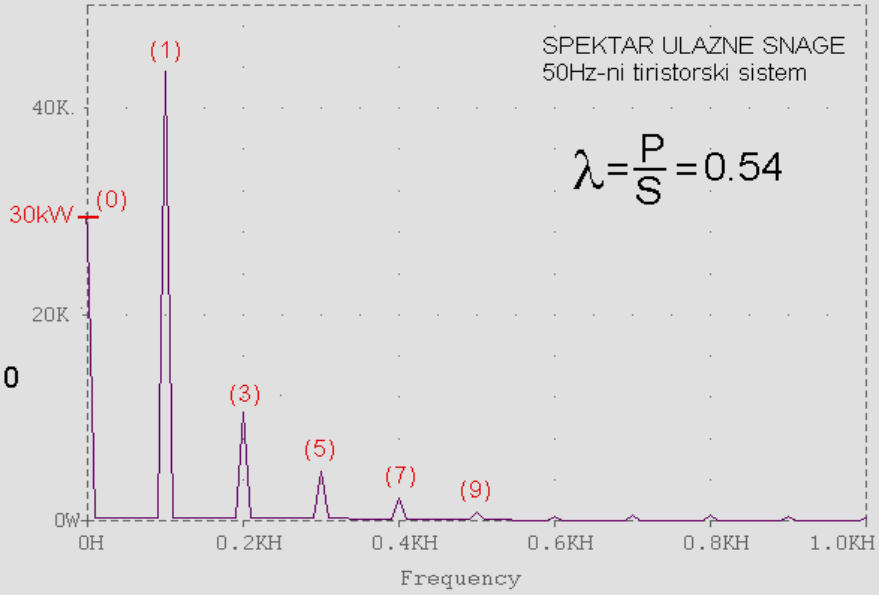
CH1: mrežni napon (linijski napon) 400V/c TIME: 5ms/c

CH2: mrežna struja 200A/c

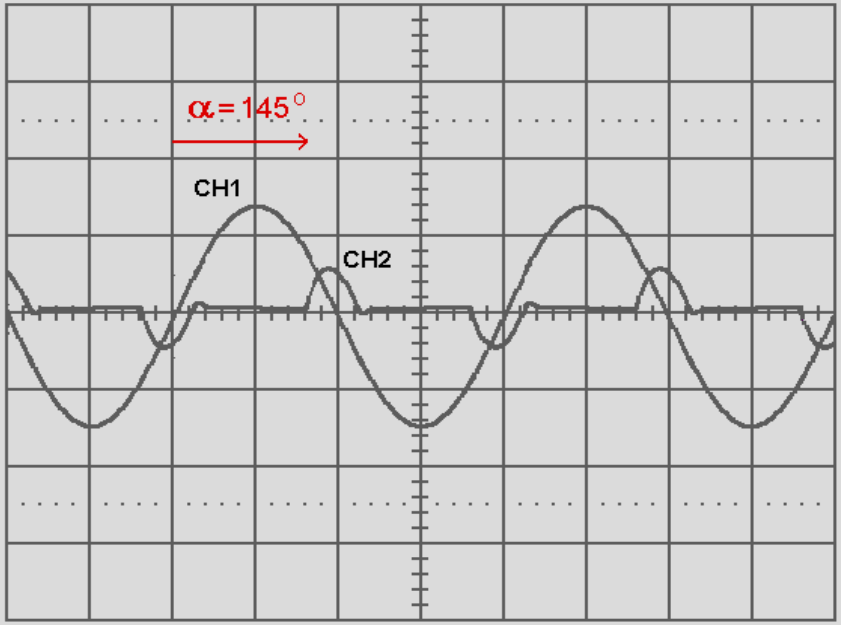




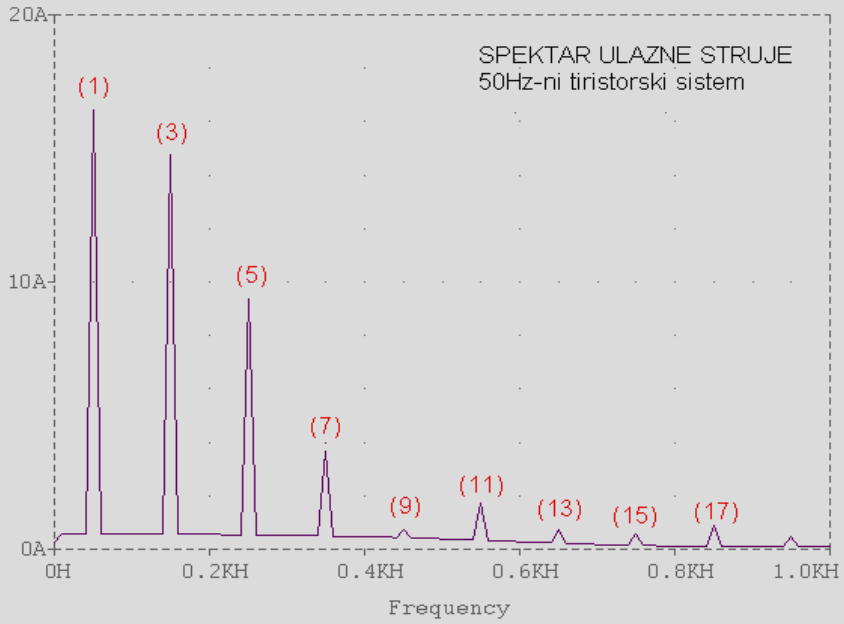
CH1: trenutna ulazna snaga 20kVA/c TIME: 5ms/c

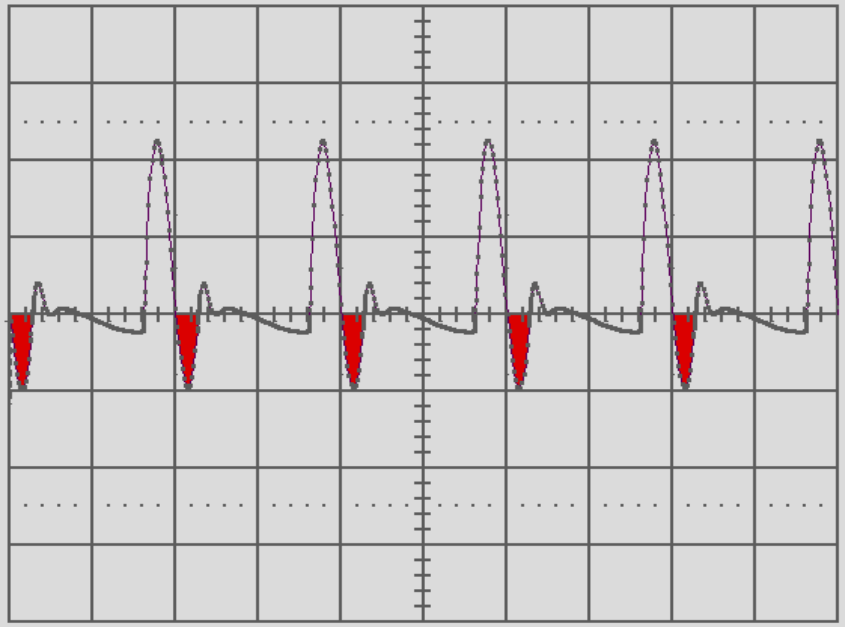


Realni talasni oblici i spektri 50Hz-ni sistem (fazni ugao 145°)

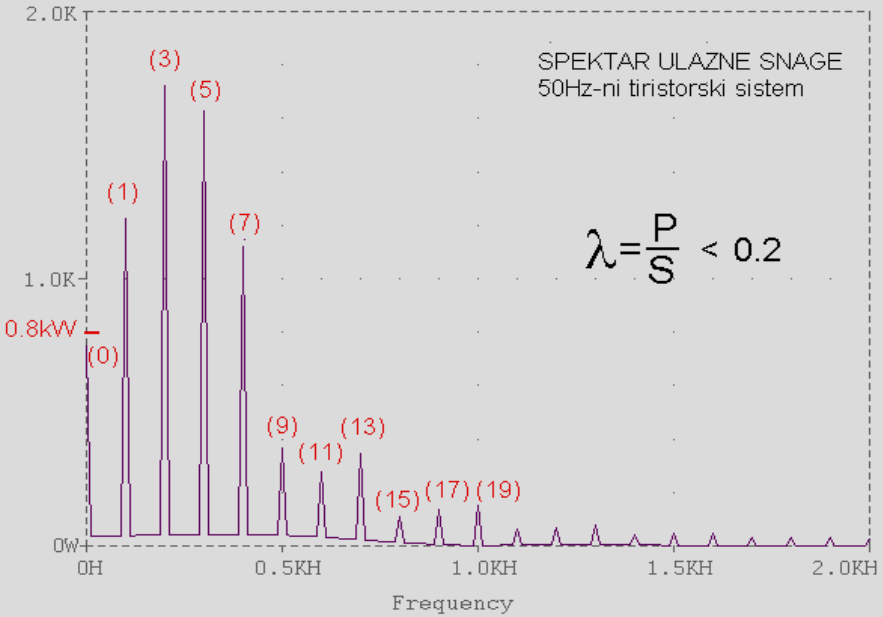


CH1: mrežni napon (linijski napon) 400V/c TIME: 5ms/c
CH2: mrežna struja 100A/c





CH1: trenutna ulazna snaga 3 kVA/c TIME: 5ms/c



institut MIHAJLO PUPIN

KONKRETNI PROJEKTI u okviru kojih su razvijena i realizovana tiristorska napajanja ESI

- U periodu 2000-2002 u sklopu rekonstrukcije postrojenja na TE "Kolubara"-V.Crljeni, u saradnji Instituta "Mihajlo Pupin", Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu i firme SCHRAKOM- Srbija izvršena je optimizacija rada analognog upravljačkog sistema tiristorskog pretvarača visokonaponskog elektrostatičkog filtera proizvodnje SCHRACK na kotlu 6 bloka A5 .
- U okviru projekta Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja TR6610-

  "Razvoj tehnologije i uređaja za efikasnu elektrofiltraciju dima u termoelektranama i toplanama ", u okviru programa tehnološkog razvoja u oblasti energetskih tehnologija i rudarstva, u periodu 2005-2008, u saradnji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Instituta "Nikola Tesla" i Instituta "Mihajlo Pupin", razvijena je nova tehnologija bazirana na tiristorskoj kontroli i intermitentnom režimu rada čime je značajno uvećana efikasnost elektrostatičkog izdvajanja čvrstih materija na termo-blokovima.

institut MIHAJLO PUPIN

REZULTATI PROJEKTA TR6610

- U okviru ovog projketa su razvijena i praktično realizovana dva 50Hz-na tiristorska sistema ESI (jedan je ugrađen na TENT-A1 u toku 2006 godine, a drugi na TENT-A4 u toku 2007 godine. Oba sistema su trenutno u eksploataciji.
- Novi upravljački sistem ESI je rezultovao značajnim poboljšanjem kvaliteta vazduha u Obrenovcu i okolini što su nadležni organi izmerili i dokumentovali
- U okviru razvoja nove tehnologije tiristorskog upravljanja ESI ostvareno je integrisano upravljanje naponom na elektrodama, otresanje elektroda i nadzor nad sistemom grejača
- Implementirano je intermitentno upravljanje čime se uvećavaju efekti taloženja i ostvaruje smanjenje gubitka snage
- Značajno povećana pouzdanost, redundantnost i fleksibilnost postojećeg postrojenja

Deo ESI postrojenja na TENT-A4/ Elektrodni sistem

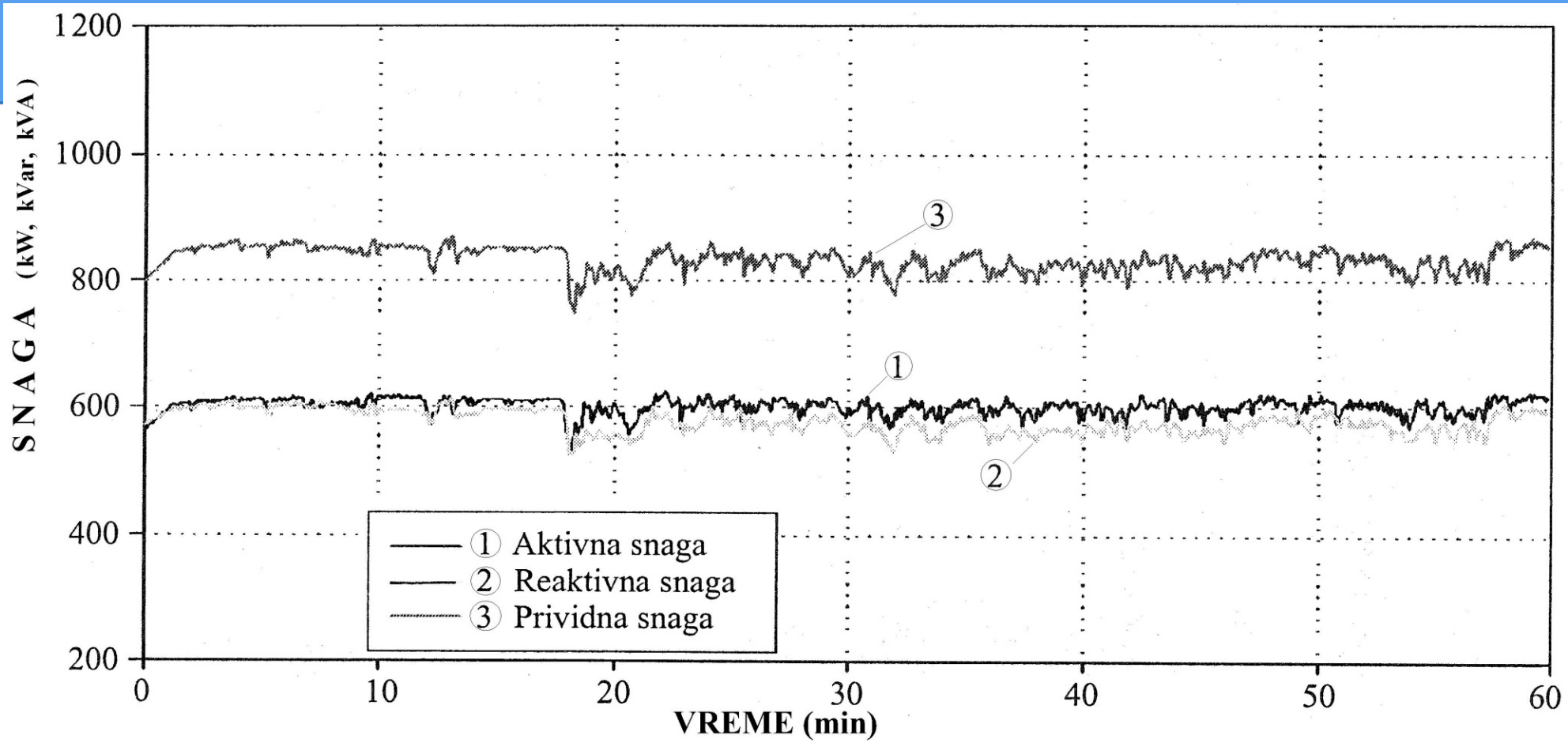
TENT-A4

institut MIHAJLO PUPIN

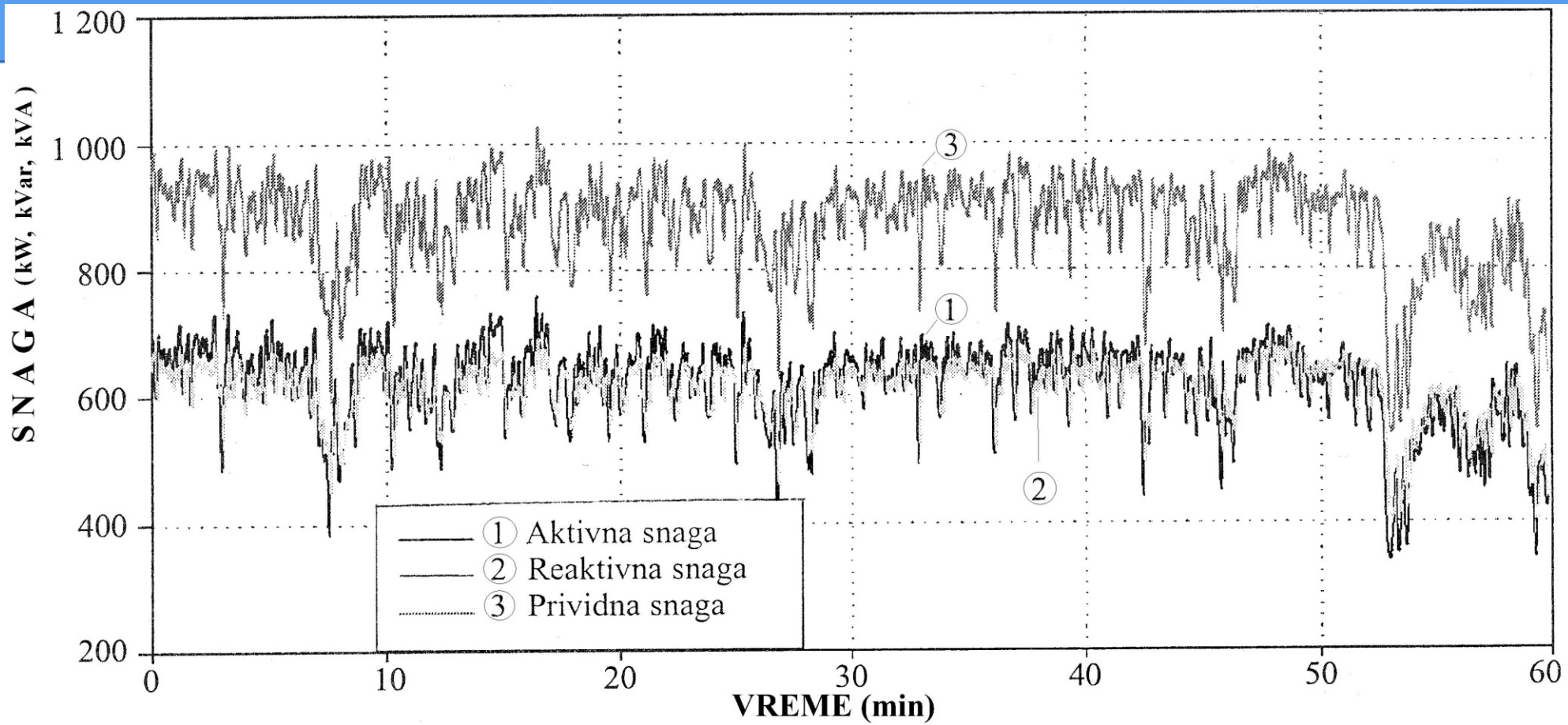
Tiristorski (SCR) blok
sa zaštitnim elementima i sistemom
za hlađenje

Izgled GRO i DSP kontrolera

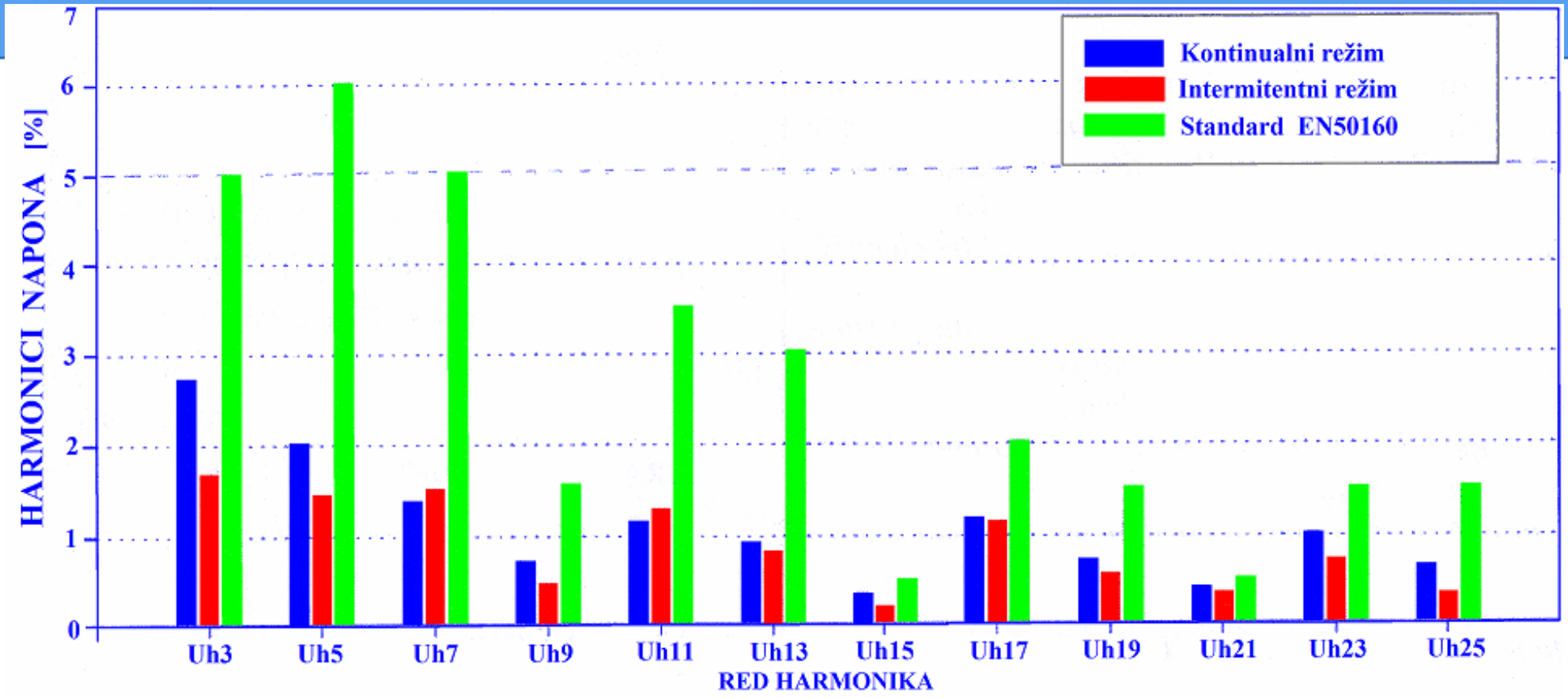
institut MIHAJLO PUPIN



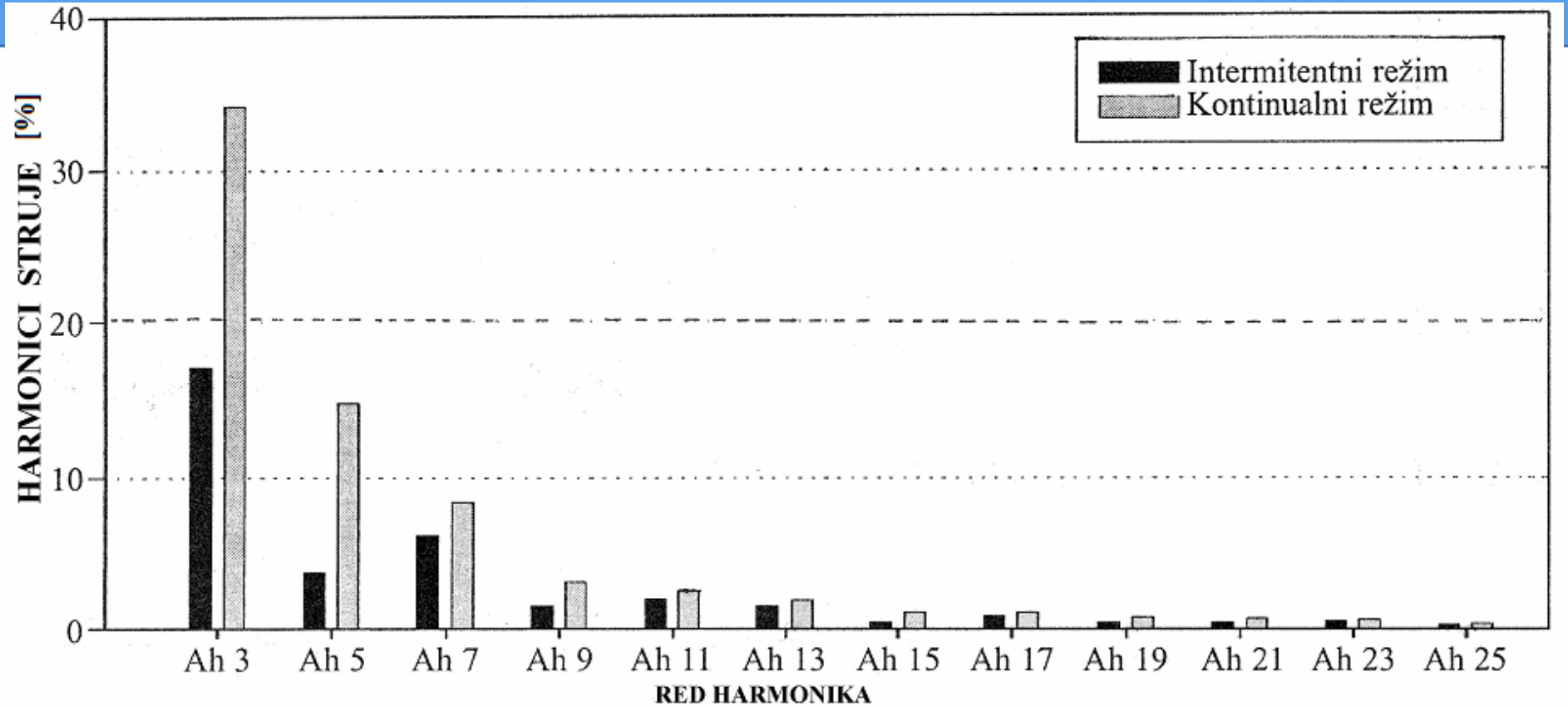
Potrošnja snage pri intermitentnom upravljanju



Potrošnja snage pri konvencionalnom upravljanju



Sadržaj harmonika mrežnog napona pri konvencionalnom (kontinualnom) i inoviranom Intermitentnom DSP upravljanju



Sadržaj harmonika mrežne struje pri konvencionalnom (kontinualnom) i inoviranom Intermitentnom DSP upravljanju

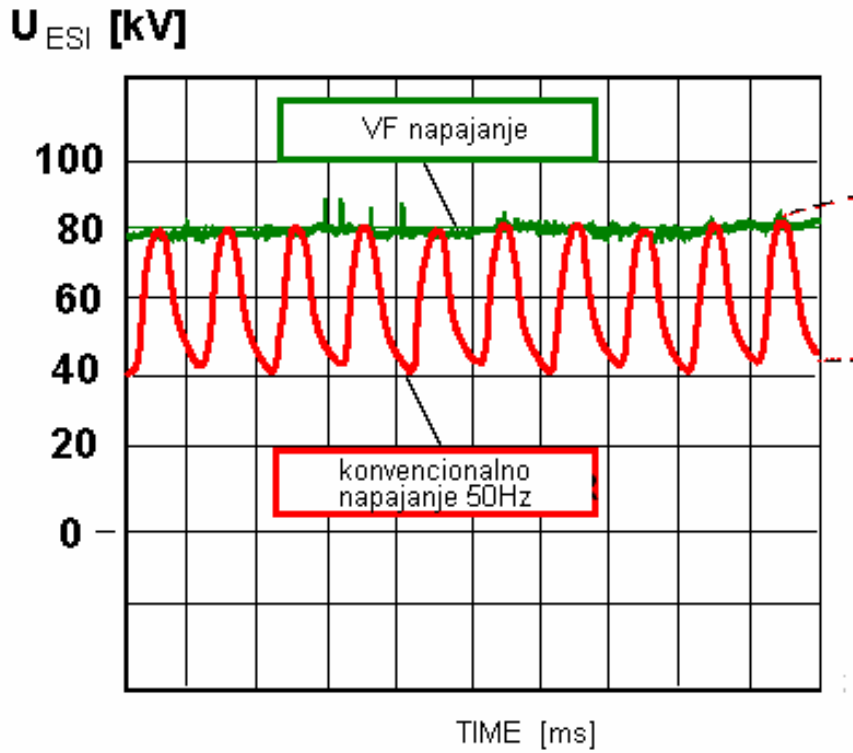
VF PREKIDAČKA NAPAJANJA

- 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).

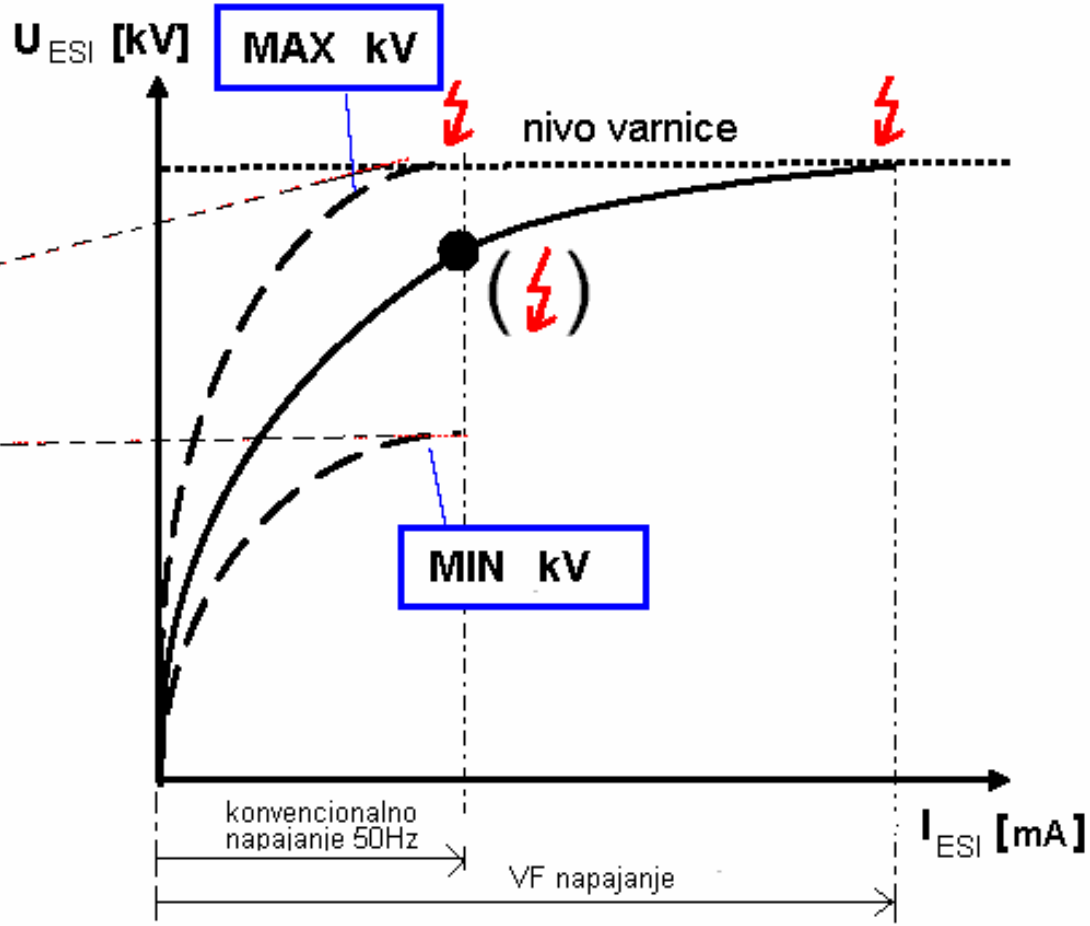
- VF prekidački izvori **obezbeđuju dramatično različite performanse i fizičke karakteristike ESI** od tiristorskih izvora napajanja

- Primenjeni 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



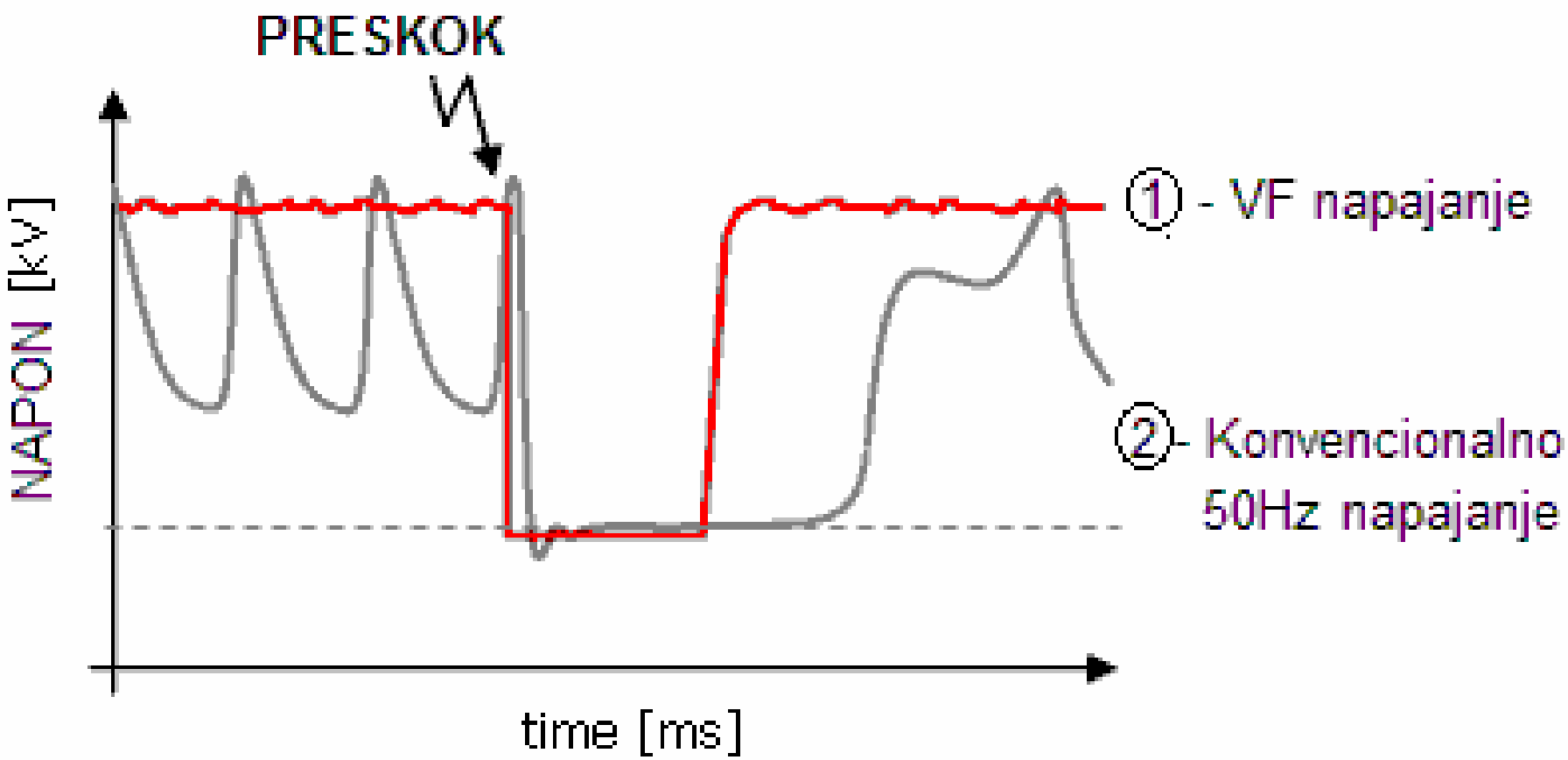
Izlazni napon ESI



U-I karakteristika

institut MIHAJLO PUPIN

POREĐENJE BRZINE ODZIVA VF I KONVENCIONALNOG NAPAJANJA



Značajno brži odziv VF sistema napajanja na preskok

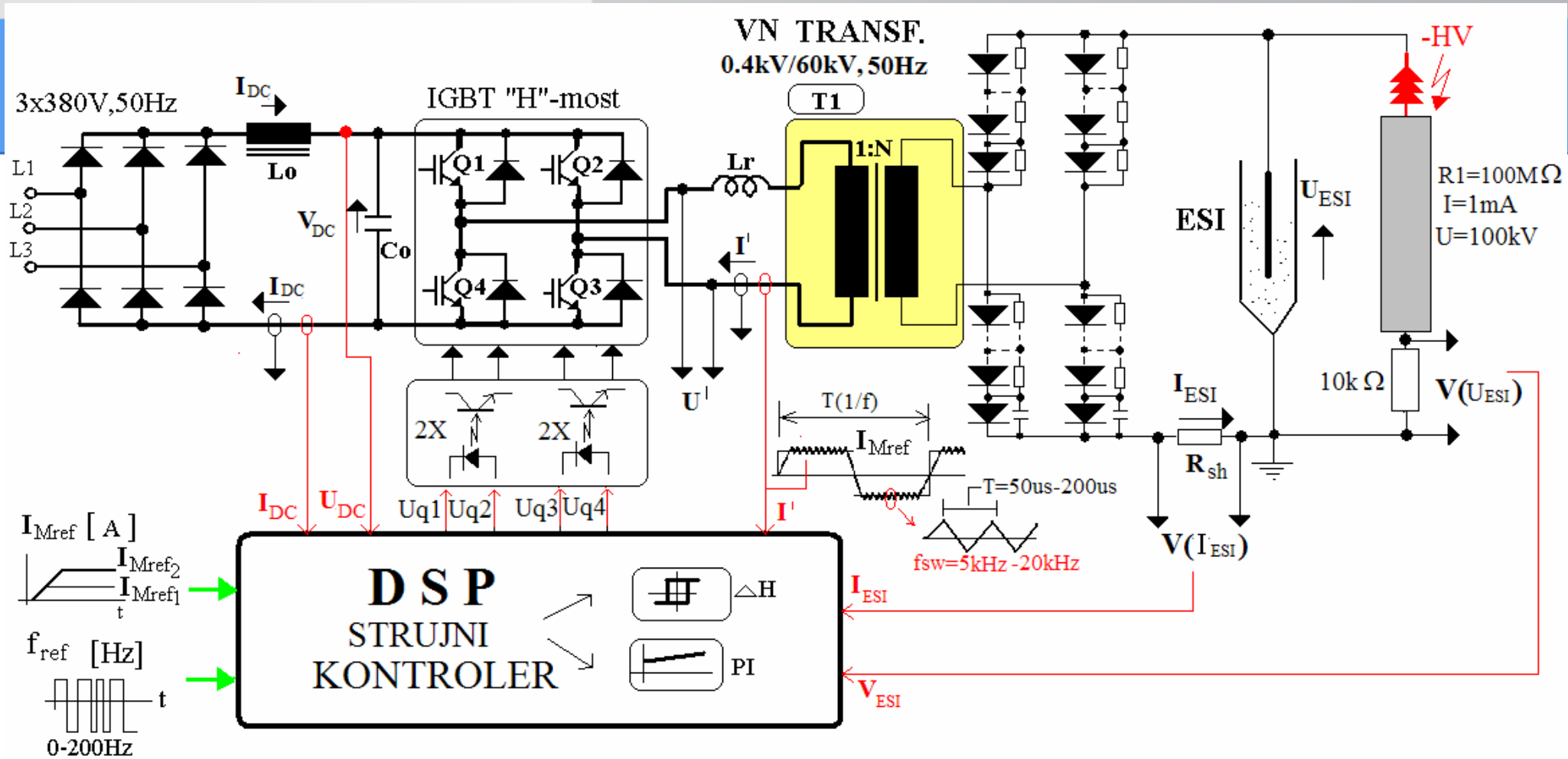
HIBRIDNO NAPAJANJE ESI

- Hibridna rešenja pretvarača „kombiuju" **dobre osobine VF napajanja** i postojećih **50Hz-*nih*** T/I modula.

- U ovim slučajevima se primarni namotaji VNT napajaju sa pravougaonim talasnim oblicima struje podesive ampltude i učestanosti.

- **Motivacija za razvojem hibridnog napajanja je nastala iz razloga što većina ESI postrojenja na TE u okviru *EPS-a* poseduje grupe T/I za 50Hz, tako da je na elektrodama ESI moguće postići brzo upravljiv napon male talasnosti, sa svim pozitivnim efektima koje ovo prouzrokuje.**

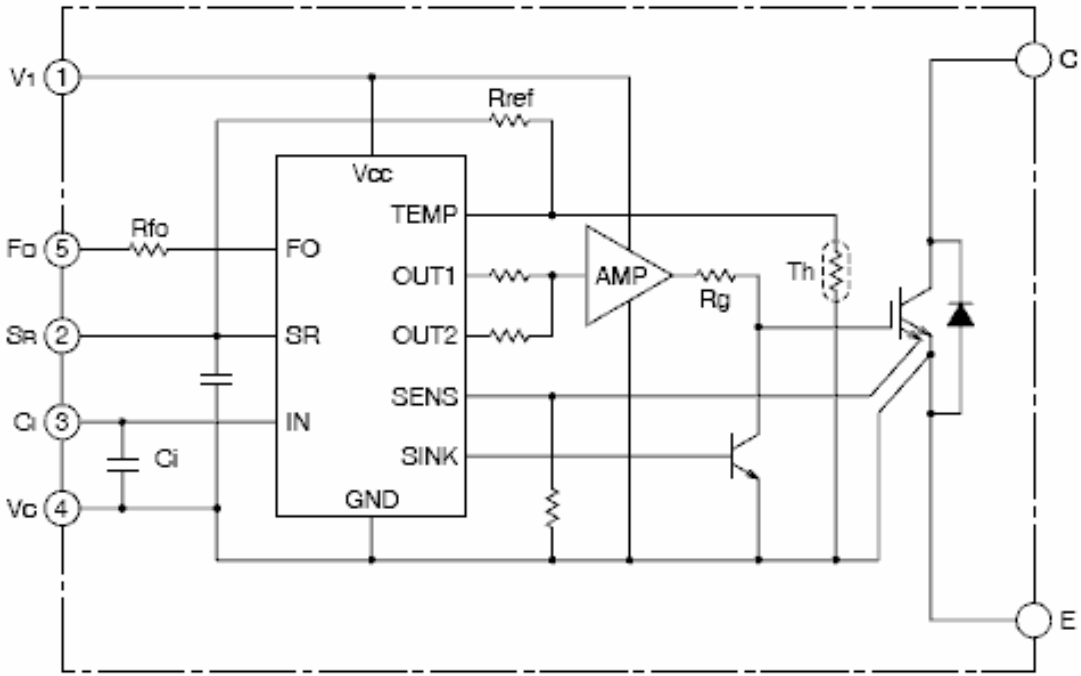
Topologija retrofitnog (hibridnog) napajanja ESI



Zadržava standardni 50Hz-ni VN transformator (VNT), ali sa značajnom izmenom pretvaračkog dela koji je sada baziran na visokofrekventnoj (VF) topologiji energetskog pretvarača sa programiranom strujnom kontrolom i korišćenjem IGBT tranzistorskog H-mosta. Osnovna komponenta primarne struje VNT-a je učestanosti 200-800Hz , sa superponiranom talasnosti struje (< 1%) čija je učestanost 5-10kHz .

institut MIHAJLO PUPIN

INTELIGENTNI IGBT PREKIDAČKI MODULI



Interna arhitektura IGBT modula

- Radne struje 300A-500A, radni napon 1200V
- Pobuda prekidača u H - mostu je ostvarena preko inteligentnih drajverskih kola integrisanih u samom IGBT modulu.
- U drajverskom kolu su integrisane prekostrujna i nad temperaturna zaštita modula.

KRITERIJUM ZA IZBOR UČESTANOSTI STRUJE PRIMARA

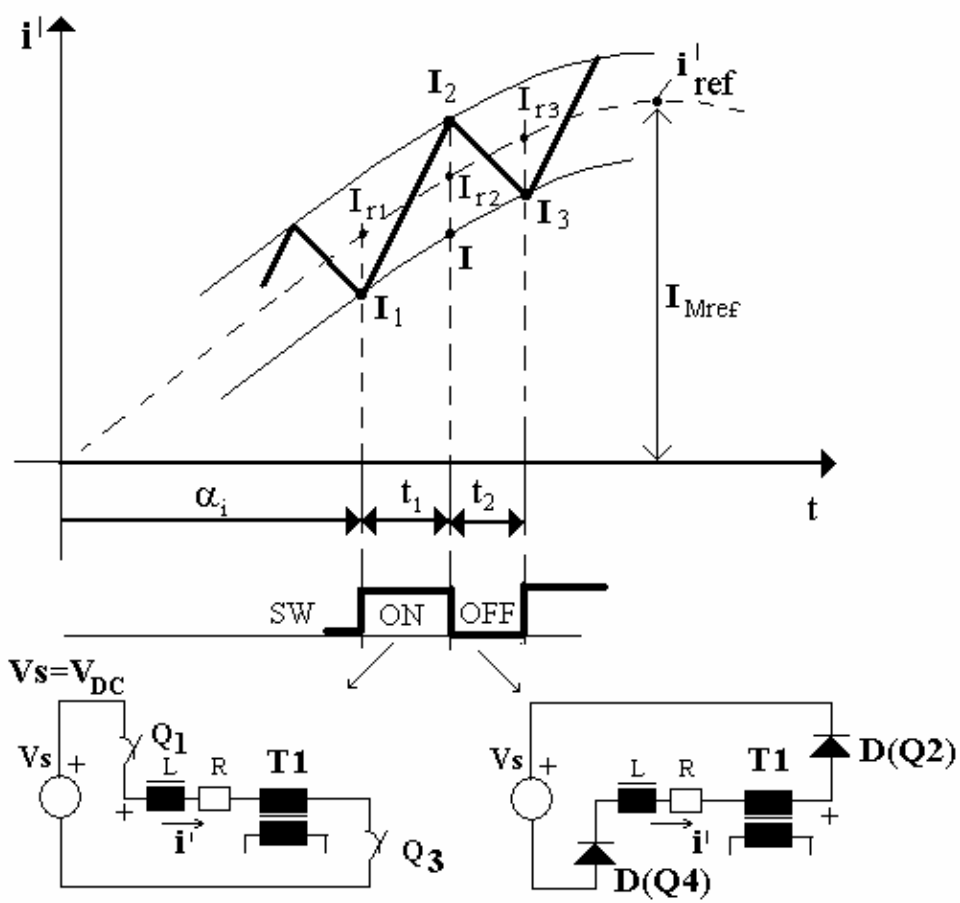
- Kriterijumi za izbor učestanosti 10 Hz - 500 Hz su bazirani na kompromisu između postizanja što manje valovitosti napona na DC strani i što manjeg opterećenja 50 Hz transformatora koji radi u rezimu $\neq$ 50 Hz, koga karakterišu izraženi harmonici struje.

- Napajanje $\neq$ 50Hz ima propratne efekte i negativno se odrazava na rad transformatora.

- Rad 50 Hz u nesinusoidalnom režimu je dobro poznat, kao i efekti.

- Svrha implementiranog algoritma je da se oni umanje koliko god je to moguće.

KRITERIJUM ZA IZBOR PREKIDAČKE UČESTANOSTI

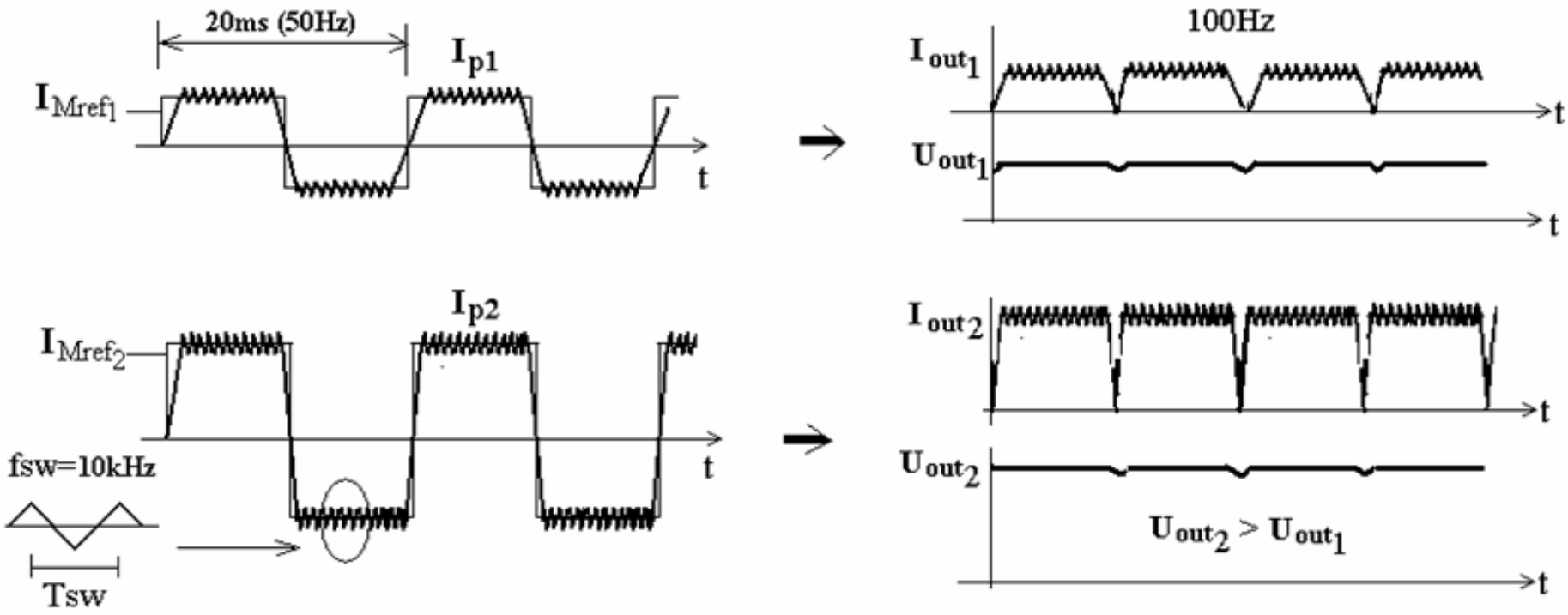


$$\Delta H = \frac{V_s}{2 \cdot L \cdot f_{sw}}$$

$$L_\sigma + L_f$$

- Opseg PWM učestanosti je između 5 kHz i 20 kHz.
- Kriterijumi za izbor PWM učestanosti su bazirani na kompromisu između postizanja što manjeg stresa izolazije sa dv/dt, a s druge strane što brže reakcije izvora.

institut MIHAJLO PUPIN



Karakteristični talasni oblici struje primara VNT i struje i napona ESI, za dve referentne vrednosti amplitude struje primara VNT I_{Mref1} I_{Mref2}

Ovim vrednostima odovaraju struje punjenja I_{out1} I_{out2} ekvivalantne kapacitivnosti ESI
odnosno trenutne vrednosti izlaznog napona na elektrodama ESI

U_{out1} U_{out2}

$$U_{out\,1} < U_{out2}$$

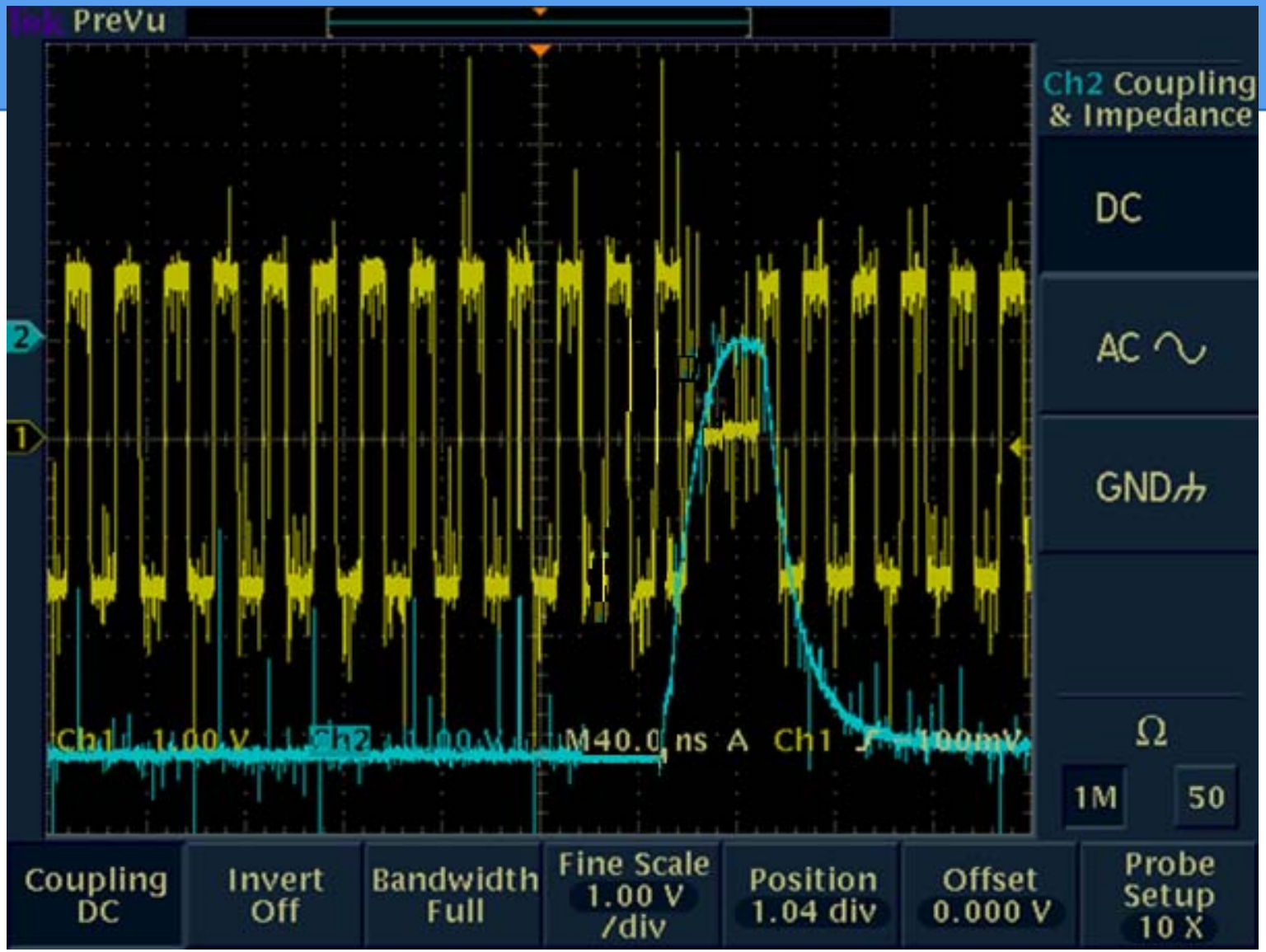
institut MIHAJLO PUPIN

Talasni oblici struje i napona primara VNT za slučaj učestanosti referentnog signala struje od 20Hz;*CH1-napon (1V/mV), CH2-struja (50A/V)*

•Osciloskopski snimci talasnih oblika struje i napona primara VNT pri punoj snazi, pri čemu je amplituda referentne vrednosti struje iznosila 150A a njena učestanost 20Hz.
•Korišćeni senzor struje je u ovom slučaju bio LEM modul LT300

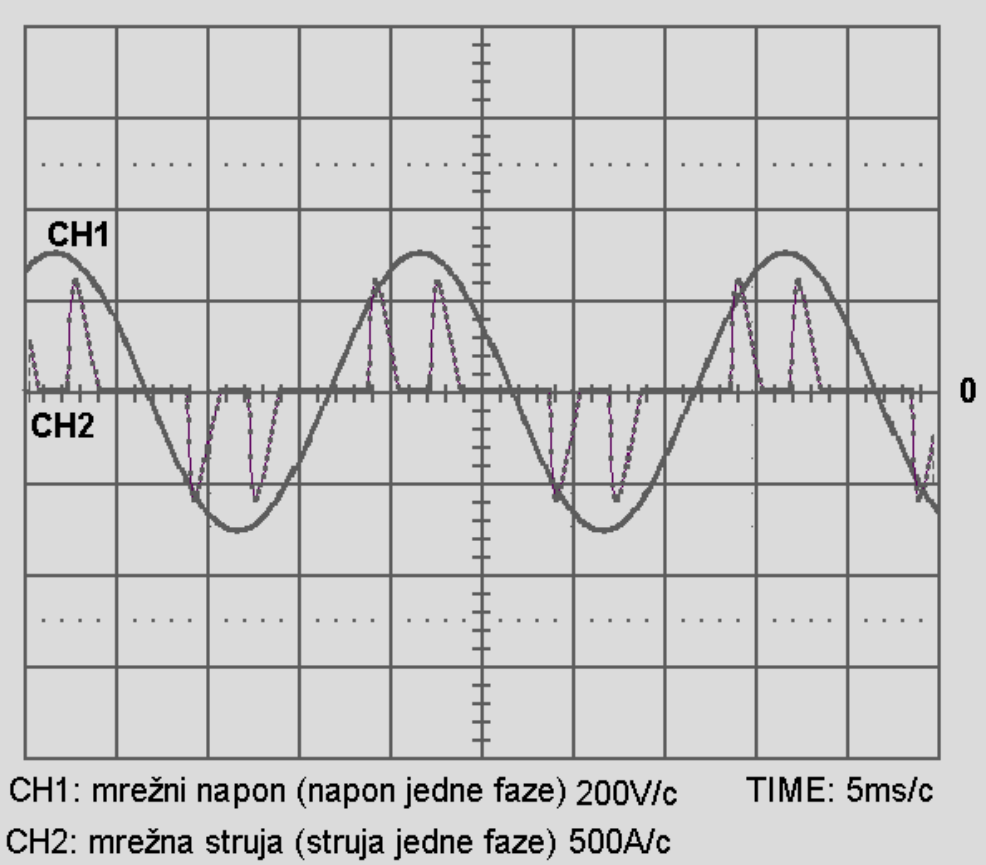
Talasni oblici struje i napona primara VNT za slučaj učestanosti referentnog signala struje od 50Hz; *CH1-napon (1V/mV), CH2-struja (1A/mV)*

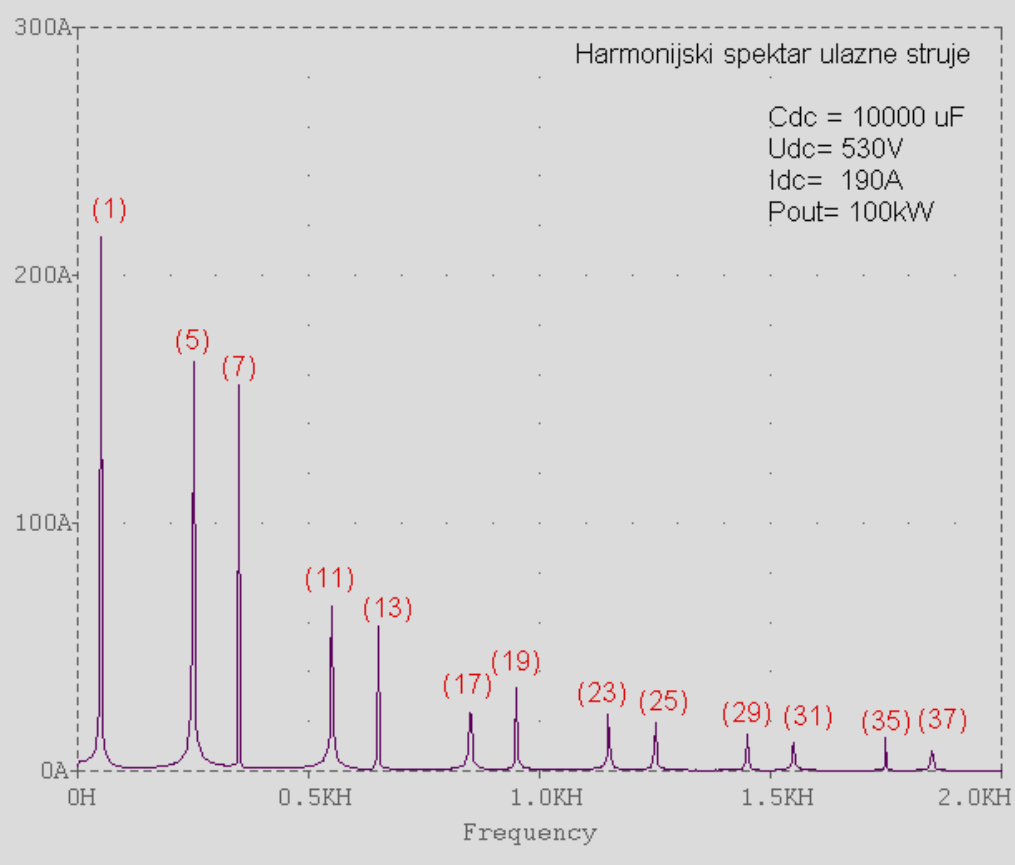
•Ociloskopski snimci talasnih oblika struje i napona primara VNT pri pri učestanosti reference od 50Hz.
•U ovom slučaju za merenje stru je korišćena strujna sonda FLUKE za opsege 60A/300A



Struja primara VNT i izlazni napon na taložnim elektrodama ESF u trenutku preskoka; CH1-struja primara VNT(žuti trag) 100A/V, CH2-negativna vrednost napona na ESF(plavi trag) 10kV/V, vremenska podela 40ms/c

Talasni oblik i spektar mrežne struje ESI retrofitne napojne jedinice sa C filtrom

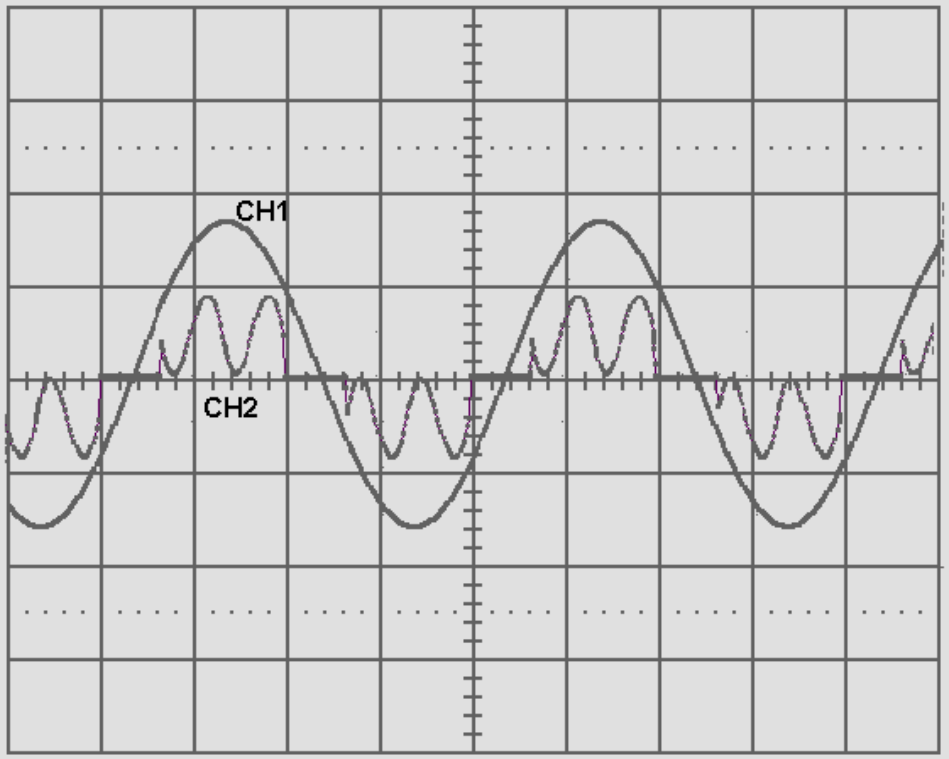




- Nema trećeg harmonika i svih harmonika deljivih sa tri u spektru, ali zato dominiraju ostali
- Osnovni harmonik mrežne struje prednjači mrežnom naponu za relativno mali ugao (faktor snage prvog harmonika ima kapacitivni karakter)
- Bogat sadržaj harmonika uslovljava relativno velike efektivne vrednosti ulazne struje
- Vršni ("crest factor") visok

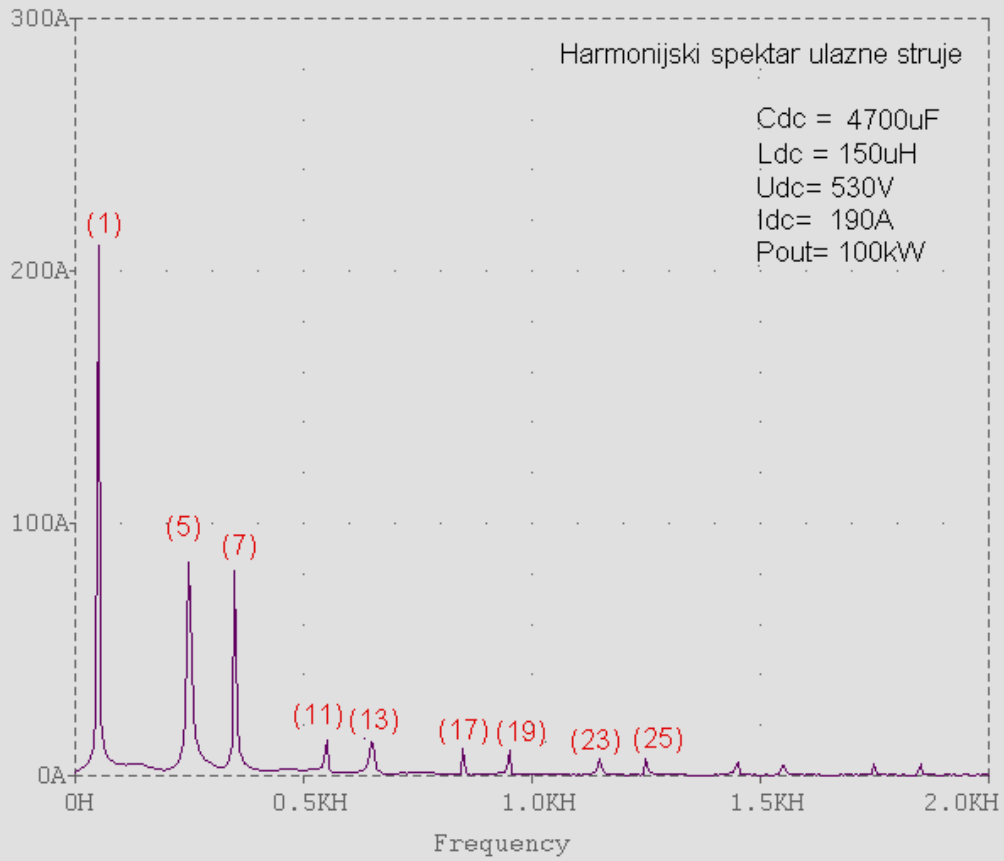
institut MIHAJLO PUPIN

Talasni oblik i spektar mrežne struje ESI retrofitne napojne jedinice sa LC filtrom (L=0.15mH)



CH1: mrežni napon (napon jedne faze) 200V/c TIME: 5ms/c

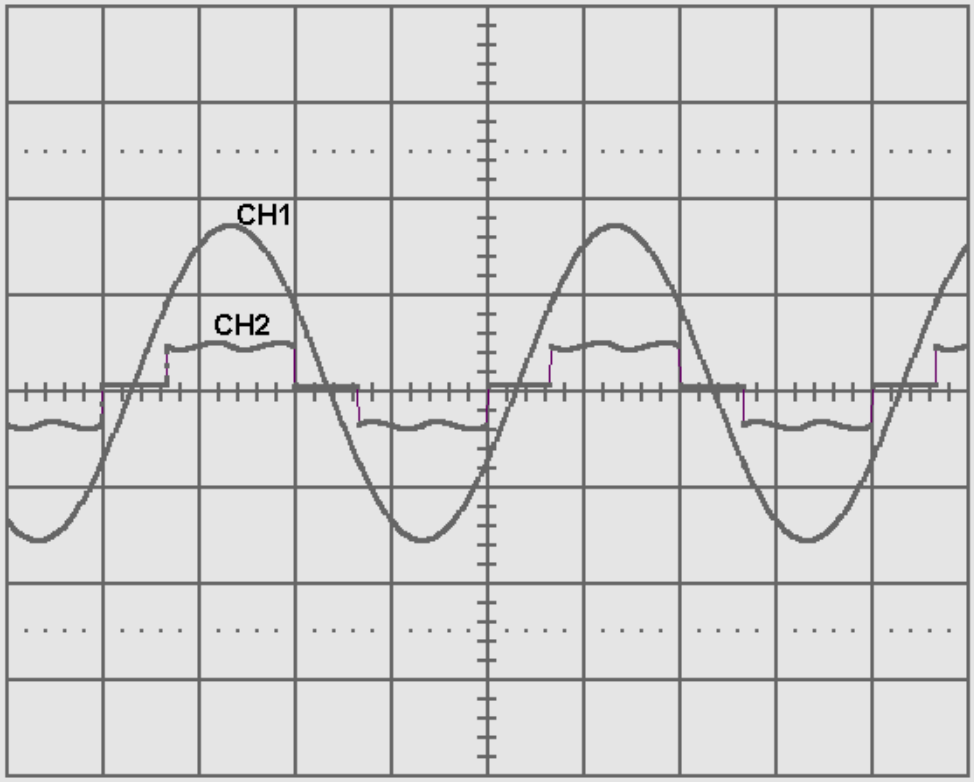
CH2: mrežna struja (struja jedne faze) 500A/c



- Nema trećeg harmonika i svih harmonika deljivih sa tri u spektru, ali zato redukovani ostali viši harmonici (5 i 7) i značajno redukovani1 harmonici (11-25)
- Osnovni harmonik je skoro u fazi sa mrežnim naponom (faktor snage prvog harmonika ima omski karakter)
- Vršni ("crest factor") je relativno mali

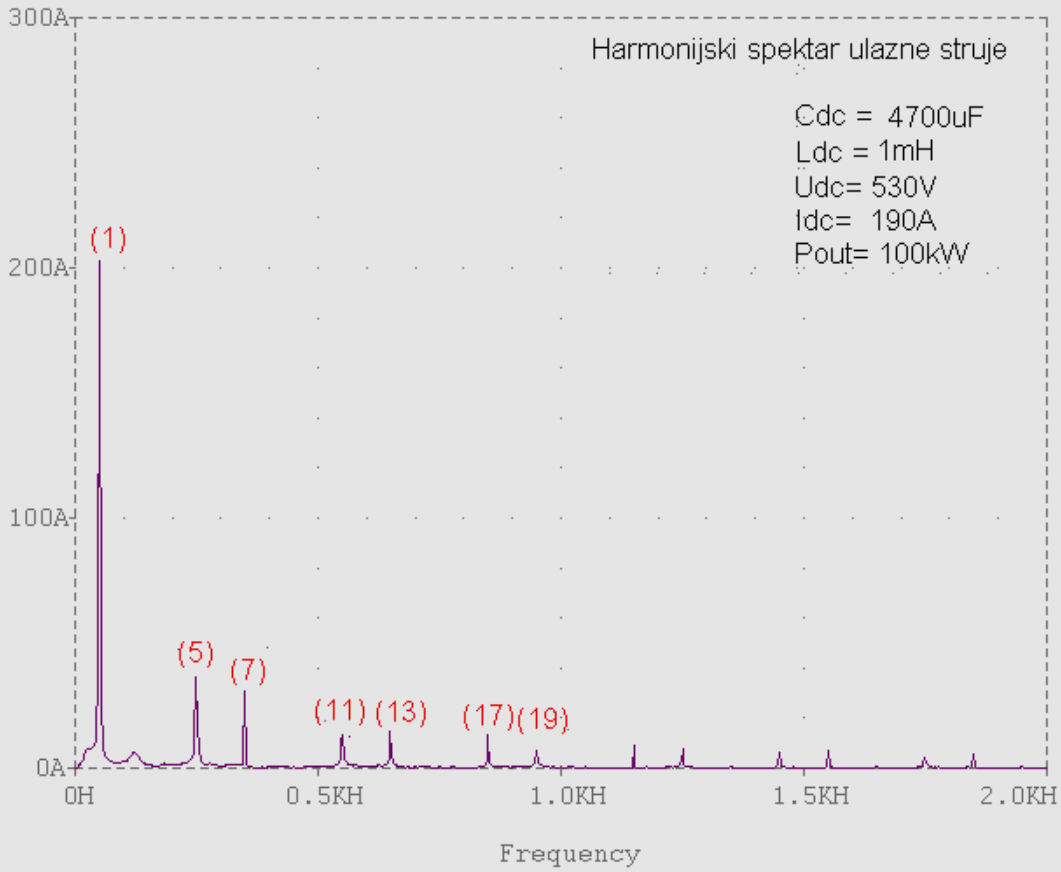
institut MIHAJLO PUPIN

Talasni oblik i spektar mrežne struje ESI retrofitne napojne jedinice sa LC filtrom (L=1mH)



CH1: mrežni napon (napon jedne faze) 200V/c TIME: 5ms/c

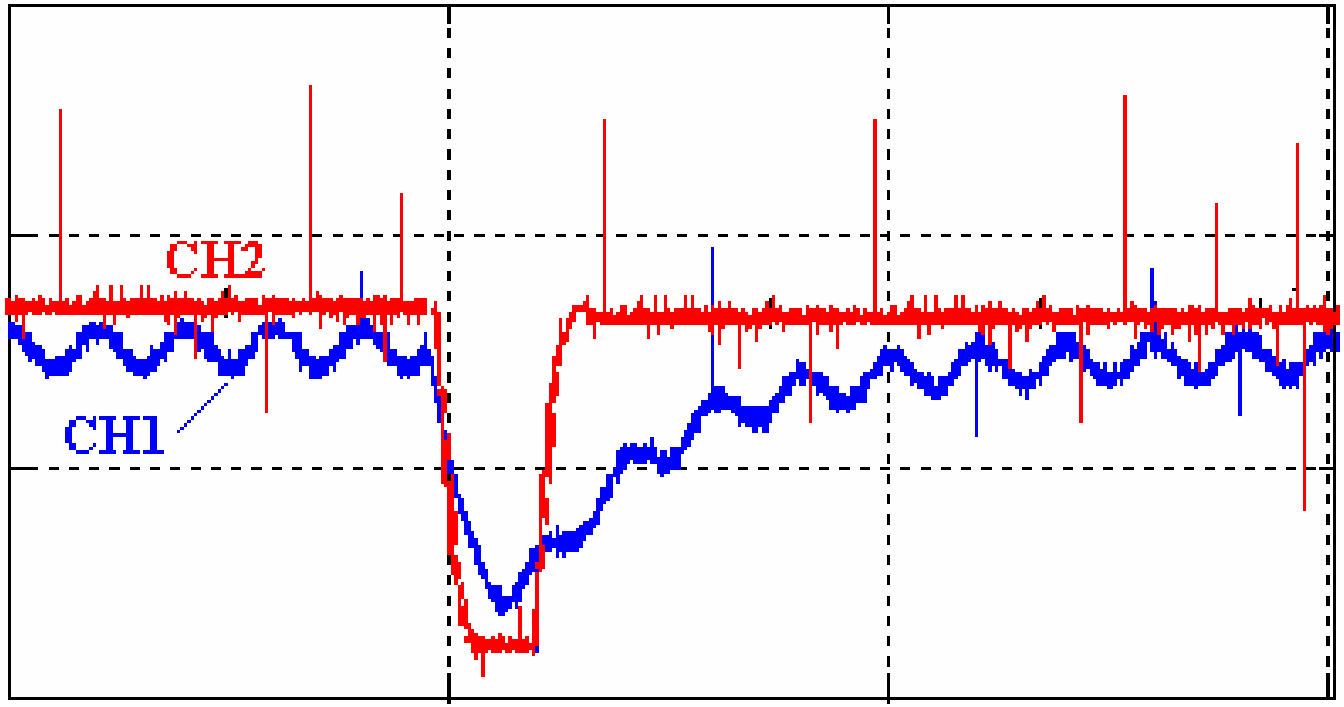
CH2: mrežna struja (struja jedne faze) 500A/c



- Nema trećeg harmonika i svih harmonika deljivih sa tri u spektru, i značajno su redukovani svi viši harmonici
- Osnovni harmonik je u fazi sa mrežnim naponom (faktor snage prvog harmonika ima omski karakter)
- Vršni ("crest factor") je mali

institut MIHAJLO PUPIN

POREĐENJE BRZINE ODZIVA NA PRESKOK



CH1: napon 50Hz ESI -20kV/div , TIME: 50ms/div

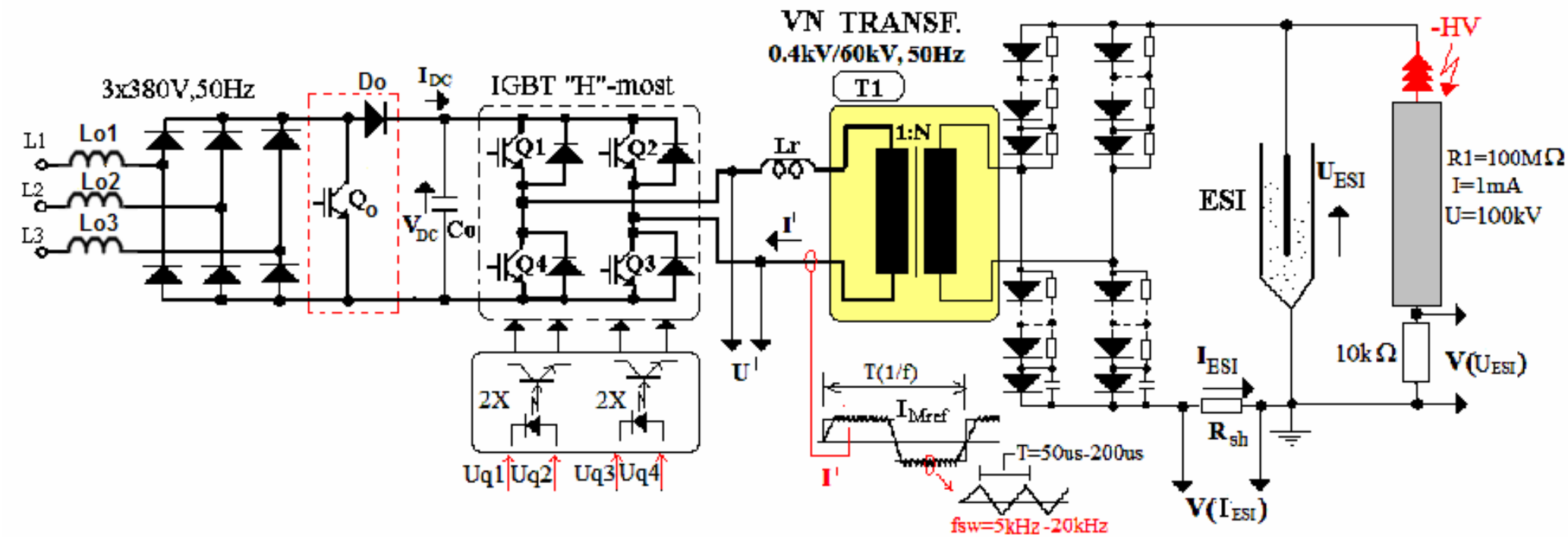
CH2: napon RETROFIT ESI-20kV/ div

RETROFIT (HIBRIDNI SISTEM)

vs

50Hz-ni sistem

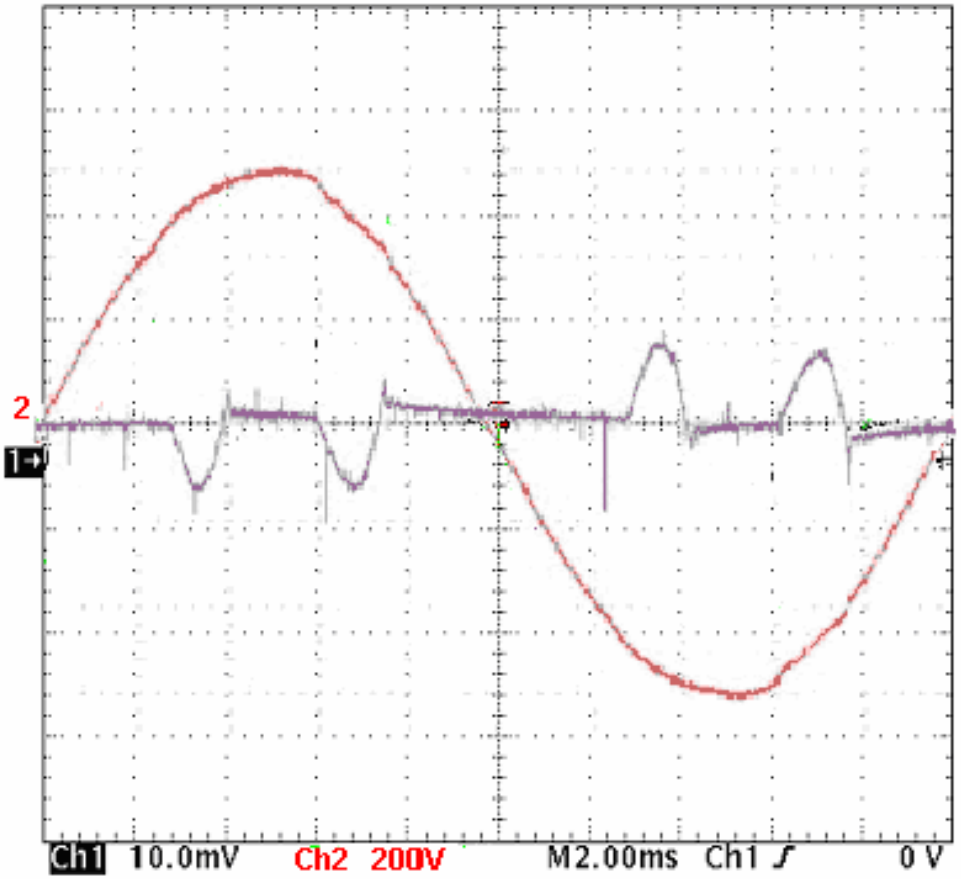
Kolo za aktivnu korekciju faktora snage



- Umesto prigušnice u DC međukolu se stavlja trofazna prigušnica na ulazu prema mreži
- U DC međukolo se ugrađuje aktivno kolo sa IGBT tranzistorom Q_o i diodom D_o.
- Elektrolit C_o ostaje u DC međukolu kolu
- L_{o1}-L_{o3}, Q_o , D_o i C_o čine AKTIVNI FILTAR kojim se vrši tzv. aktivna korekcija faktora snage
- Napon u DC među kolu zbog podizača napona je uvećan (650-700V)
- Elementi Co i Do, kao i zahtevi za povišenim naponom poskupljuju rešenje
- Ovom topologijom je postignuto značajno poboljšanje ulaznog faktora snage!!!

institut MIHAJLO PUPIN

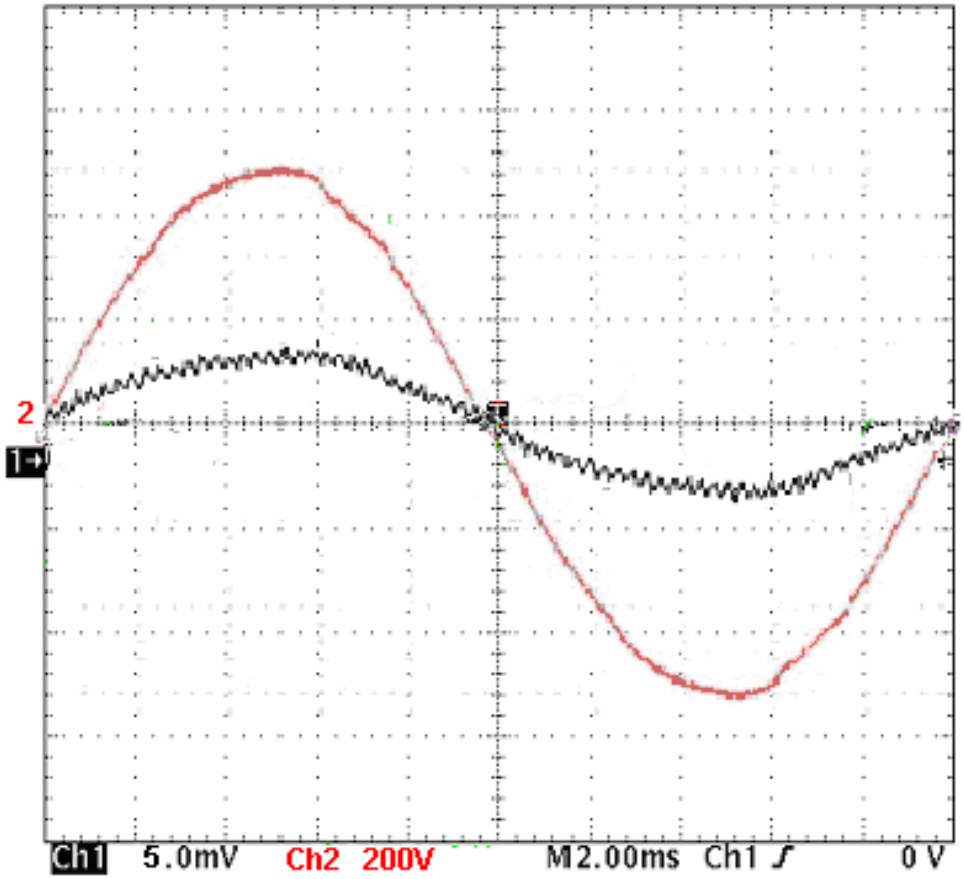
Talasni oblik ulazne struje pri aktivnoj korekciji faktora snage



Ch1- ulazna struja Ch2- ulazni napon

(a)

Talasni oblici za slučaj Lo - Co pasivnog filtra u DC međukolu



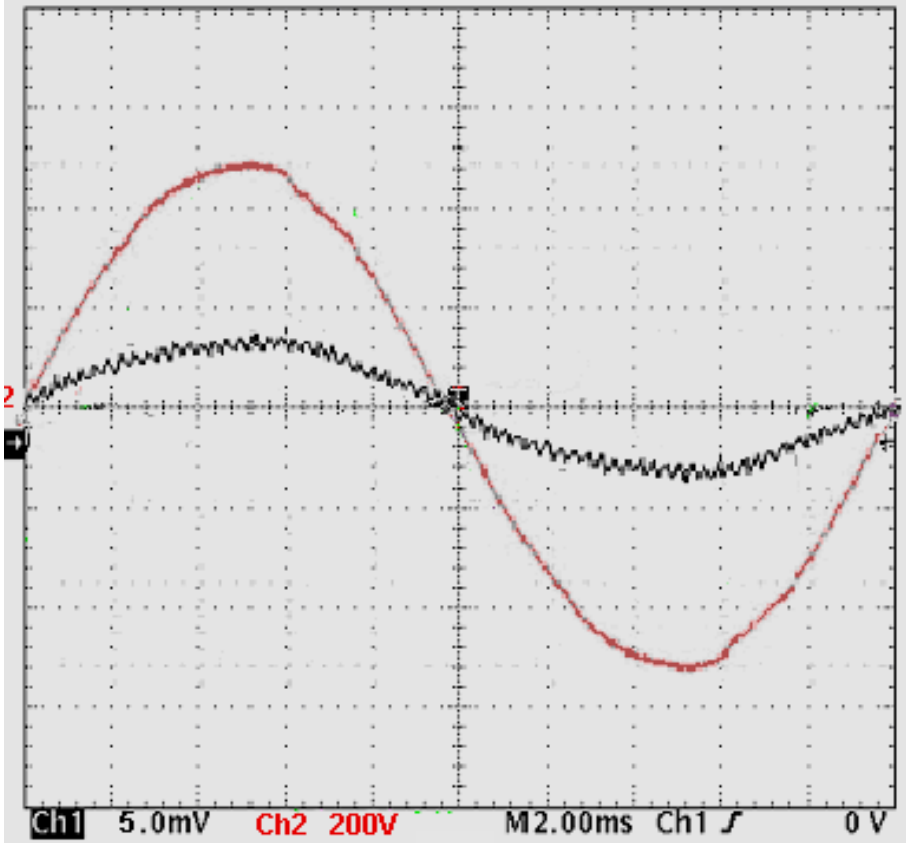
Ch1- ulazna struja Ch2- ulazni napon

(b)

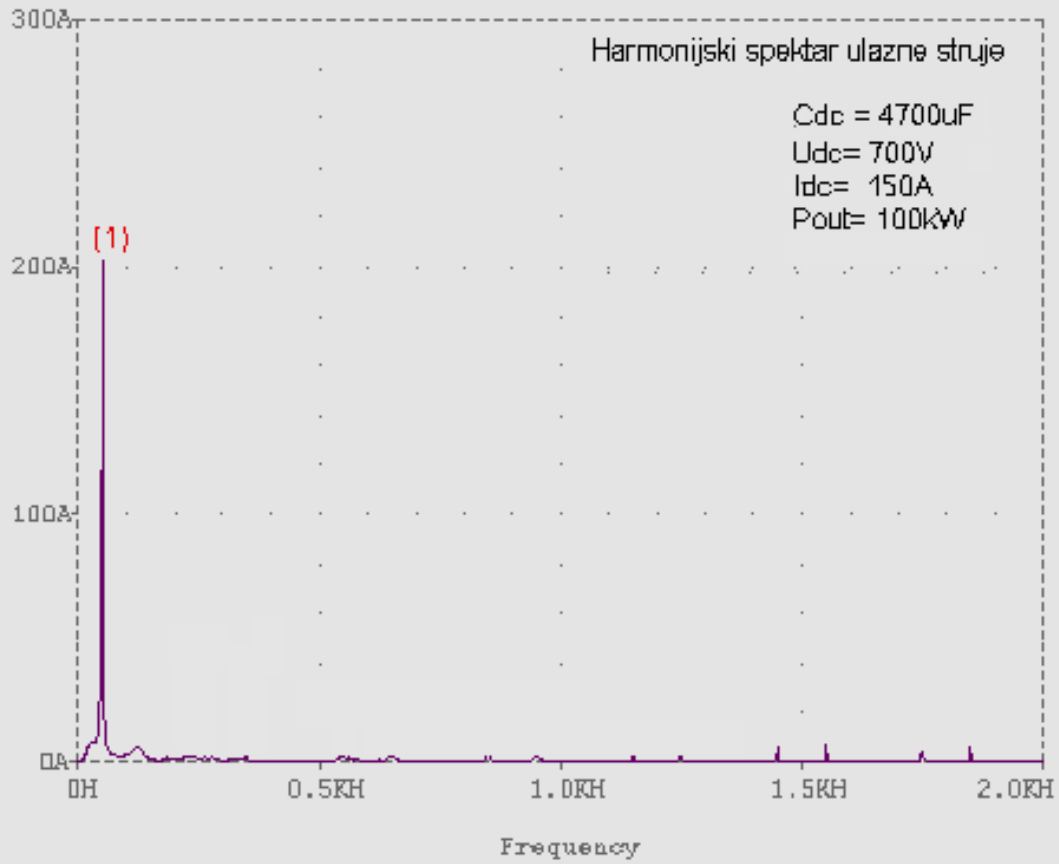
Talasni oblici za slučaj aktivnog filtra

institut MIHAJLO PUPIN

Talasni oblik i spektar mrežne struje ESI napojne jedinice sa aktivnim kolom za korekciju faktora snage



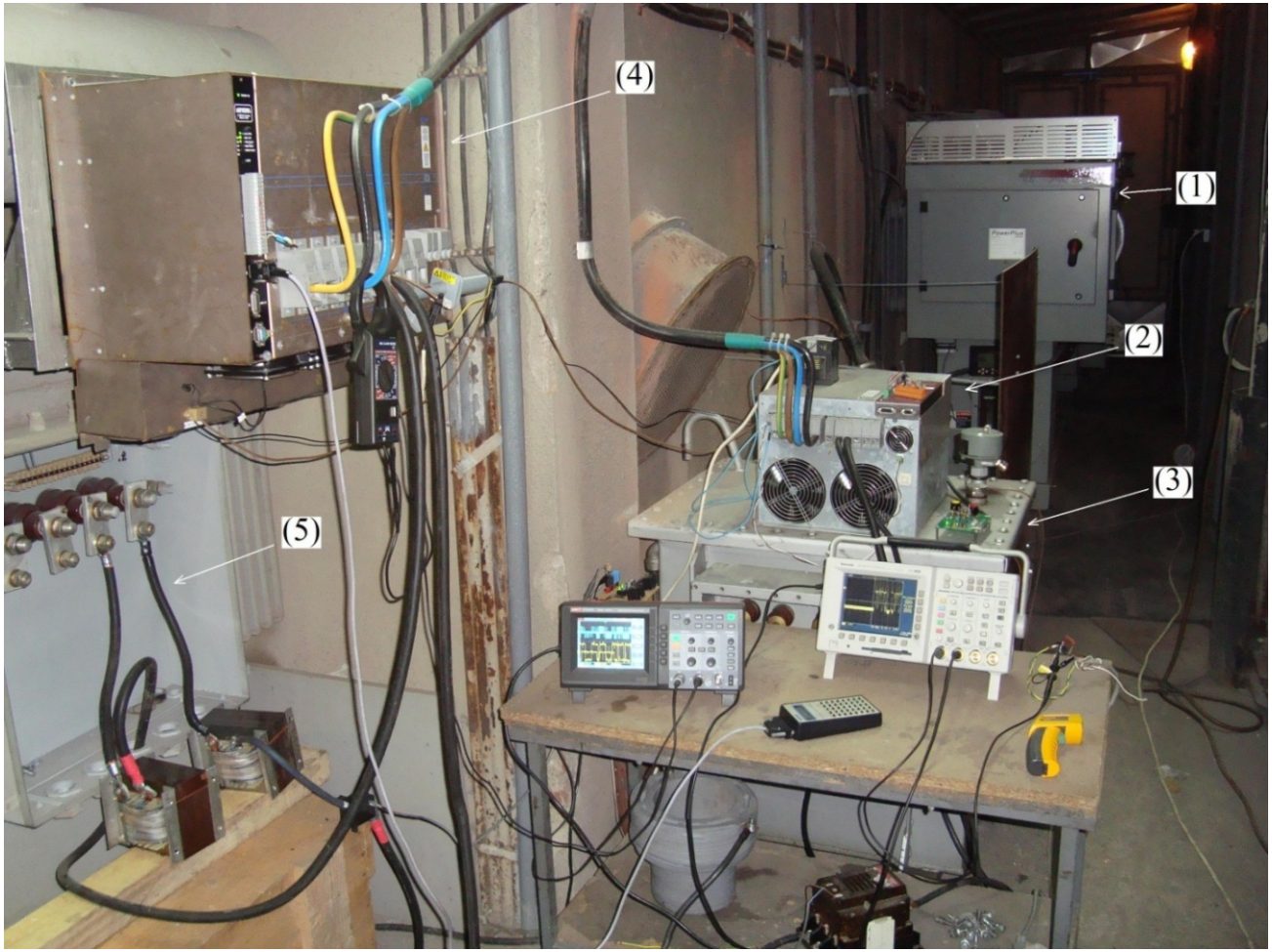
Ch1- ulazna struja Ch2- ulazni napon



U ulaznoj struji se pojavljuje samo osnovni harmonik 50Hz, koji je pri tome u fazi sa naponom mreže. Na ovaj način se iz mreže uzima samo aktivna snaga, dok je reaktivna jednaka nuli

institut MIHAJLO PUPIN

Izgled i mesto ugradnje hibridnog napajanja u realnom okruženju VF postrojenja na TE „Morava“



1-VF Rezonantni pretvarači 3x0.4kV, 50Hz/70kVDC/1A , proizvodnje NWL (2 kom)

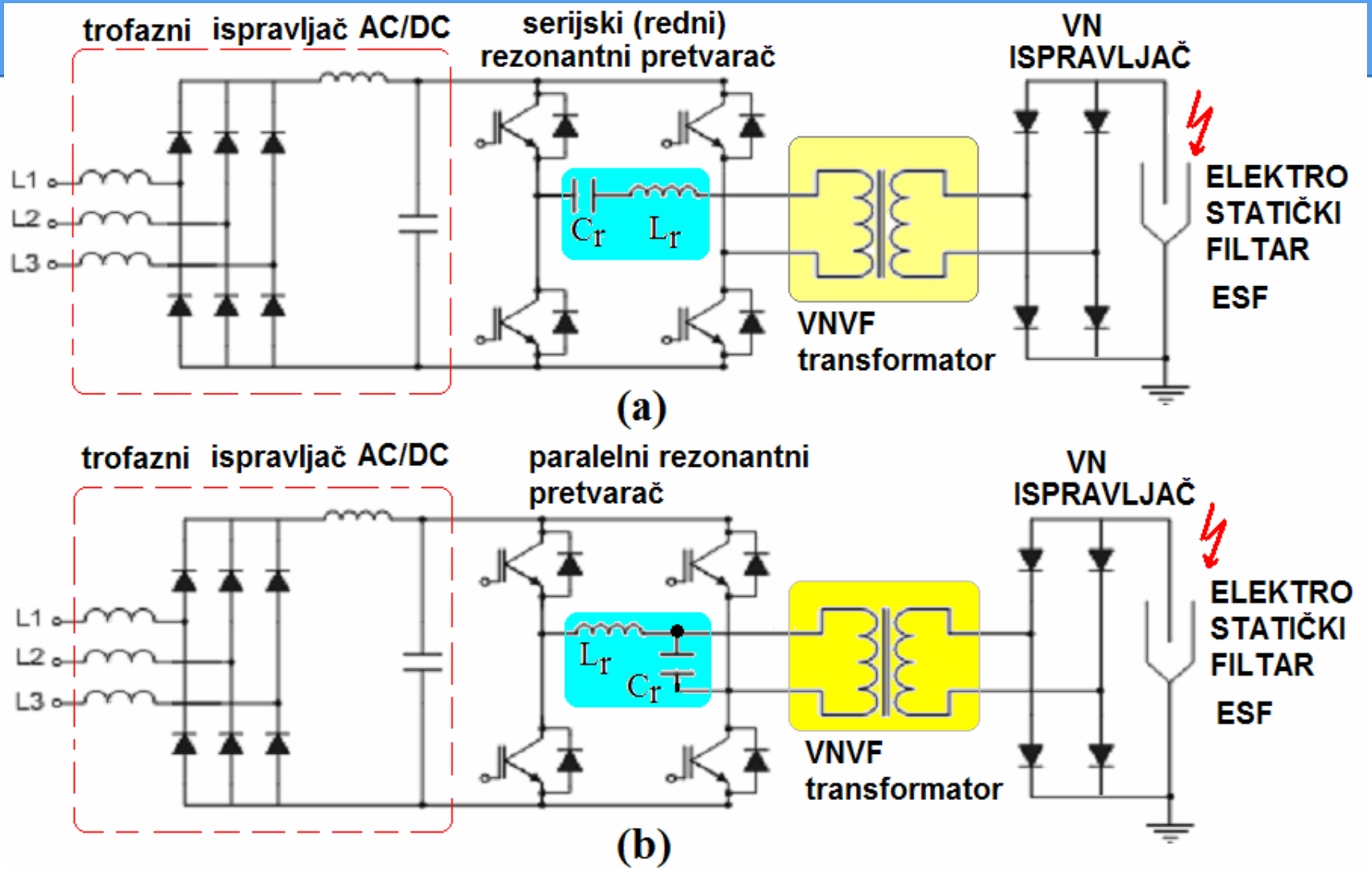
2-VF rezonantni pretvarač AR70/1000, 3x0.4kV, 50Hz/70kV DC/1A, proizvodnje ETF-Beograd (1 kom.)

3-VNVF transformator podizač napona 0.4 kV/70kV u sklopu napajanja AR70/1000,

4- Hibridno napajanje ETF DBS 180 , 3x0.4kV,50Hz/70kV DC, prividne snage 70kVA, prilagođeno postojećem VN transformatoru 50Hz.

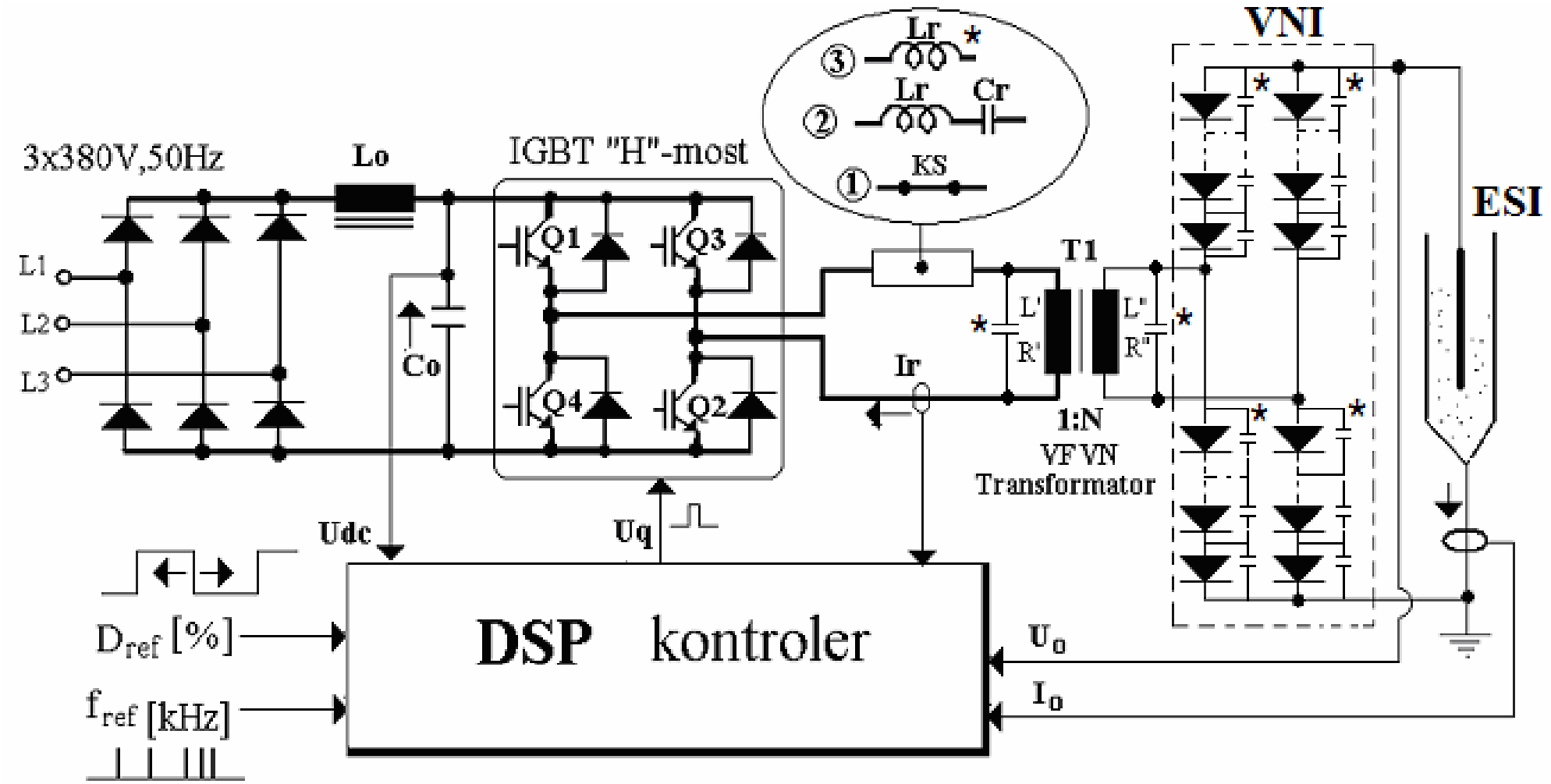
5- Postojeći VN transformator učestanosti 50Hz, 0.4/55kV, prividne snage 55 kVA

VISOKOFREKVENTNO NAPAJANJE ESI



Rezonantni VNVF energetski 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**

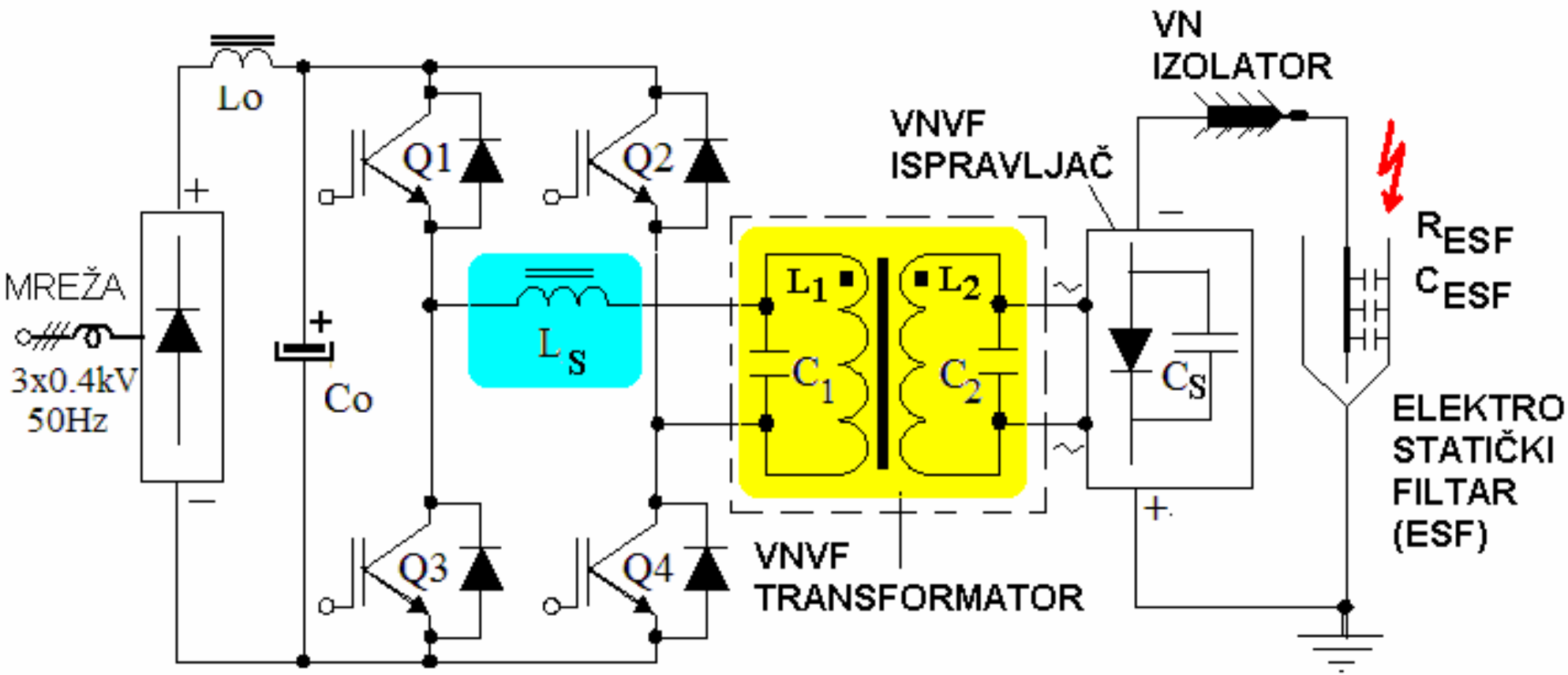
institut MIHAJLO PUPIN

Multirezonatna LC kola

- Multi-rezonantna topologija podrazumeva korišćenje prigušnice L_r u primaru VFVN transformatora i kapacitivnosti koje inherentno postoje u primaru i sekundaru ovog transformatora, kao i kapacitivnosti koje se paralelno vezuju sa diodama u VN ispravljaču.

- Kapacitivnosti u primaru i sekundaru transformatora nisu koncentrisane već su raspodeljene duž ovih namotaja, a i kapacitivnosti u VN ispravljaču su koncentrisane na svakoj pojedinačnoj diodi (vezane su paralelno) ali zbog velikog broja dioda u VNI (128 dioda u svakoj grani ispravljača) one se mogu smatrati kao raspodeljene.

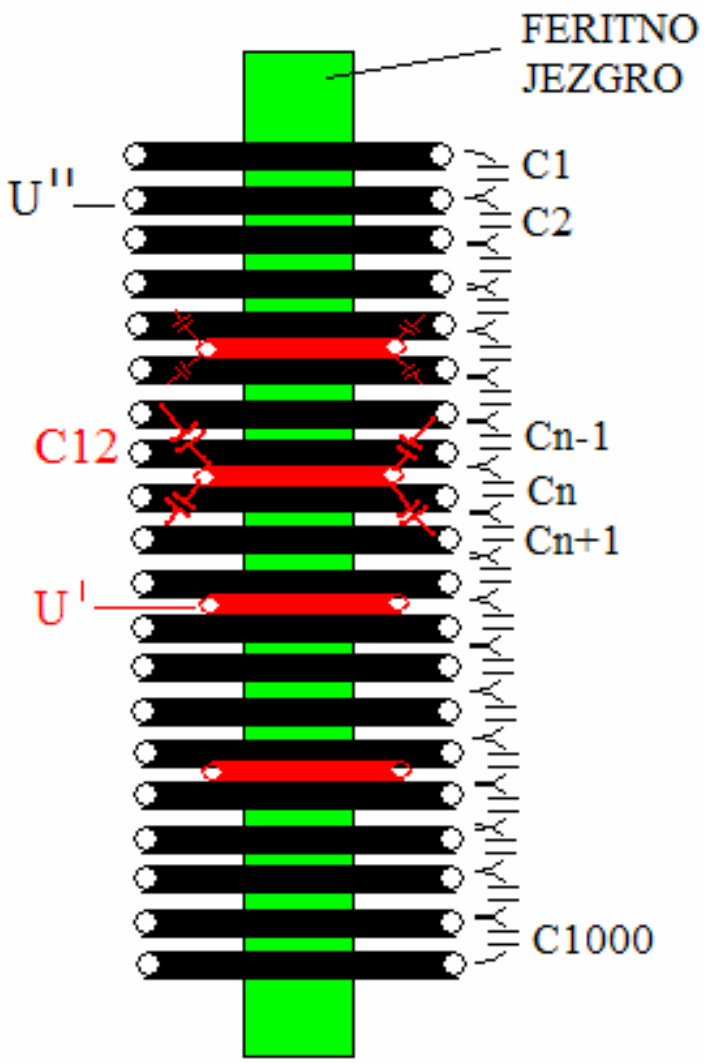
DISTRIBUIRANA MULTI-REZONANTNA TOPOLOGIJA



VELIKI IZAZOV I MOTIVACIJA → **0.4/100kV**
100kVA
VF tehnologija na 10kHz!!!!!

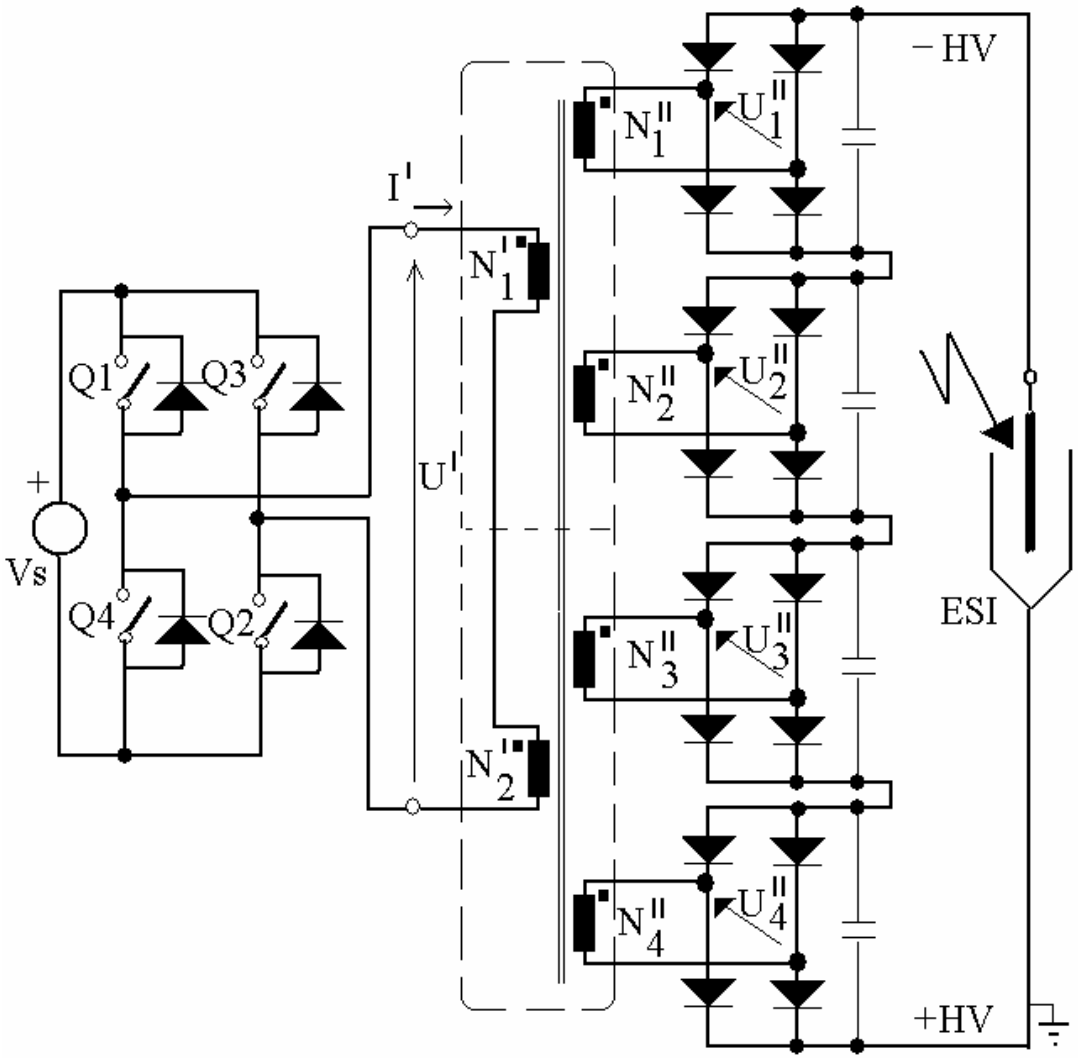
institut MIHAJLO PUPIN

VNVF transformator



- **Veliki broj navojaka koji se zahtevaju za namotaj sekundara prouzrokuju veoma visoku vrednost distribuiranog kapaciteta**
- Ova vrednost se preslikava na primarnu stranu tako što se množi sa kvadratom prenosnog odnosa transformatora i nije zanemarljiva
- Parazitni kapacitet prouzrokuje nedelotvornu struju kroz sekundarni namotaj što rezultuje značajnom smanjenju efikasnosti transformatora

KONFIGURACIJA NAMOTAJA 0.6/4x15kV

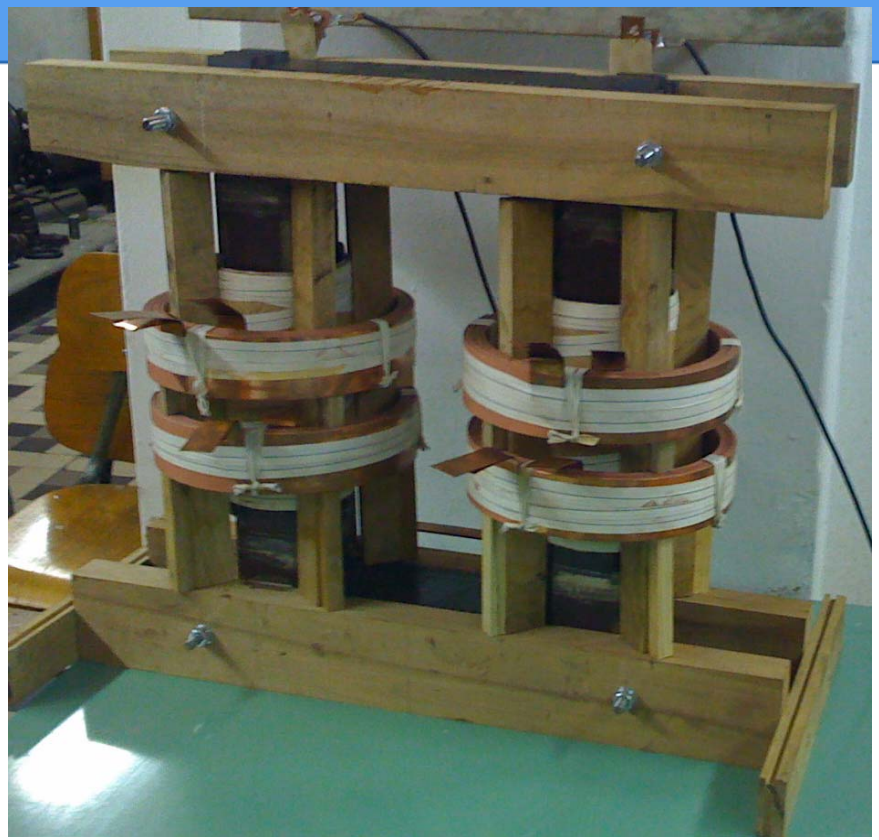


- **MINIMIZIRANJE "EKSKURZIJE" magnetnog fluksa u jezgru**
  - **Ograničenje Bmax≤300mT**

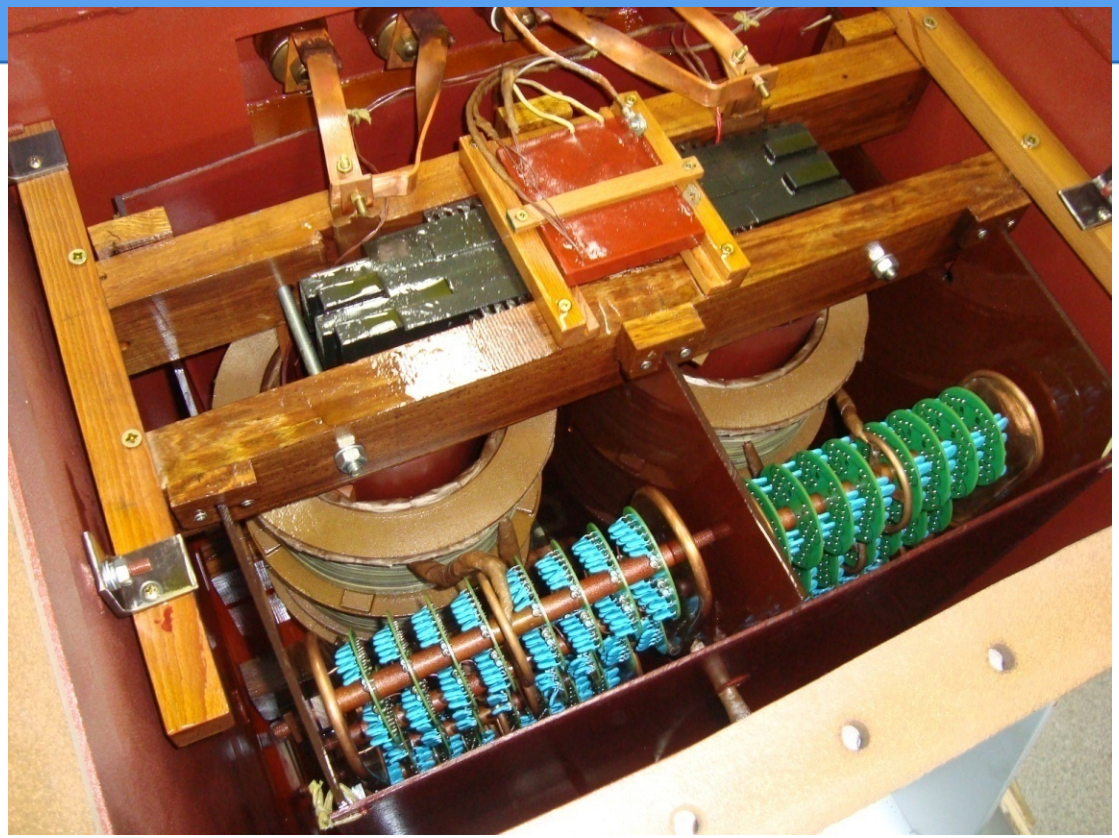
VNT je predviđen za pobudu punotalasnog ispravljača i projektovan je da ima modularni dizajn kako bi se mogao koristiti za različite naponske nivoe-*Umax*.

institut MIHAJLO PUPIN

IZGLED VNVF TRANSFORMATORA

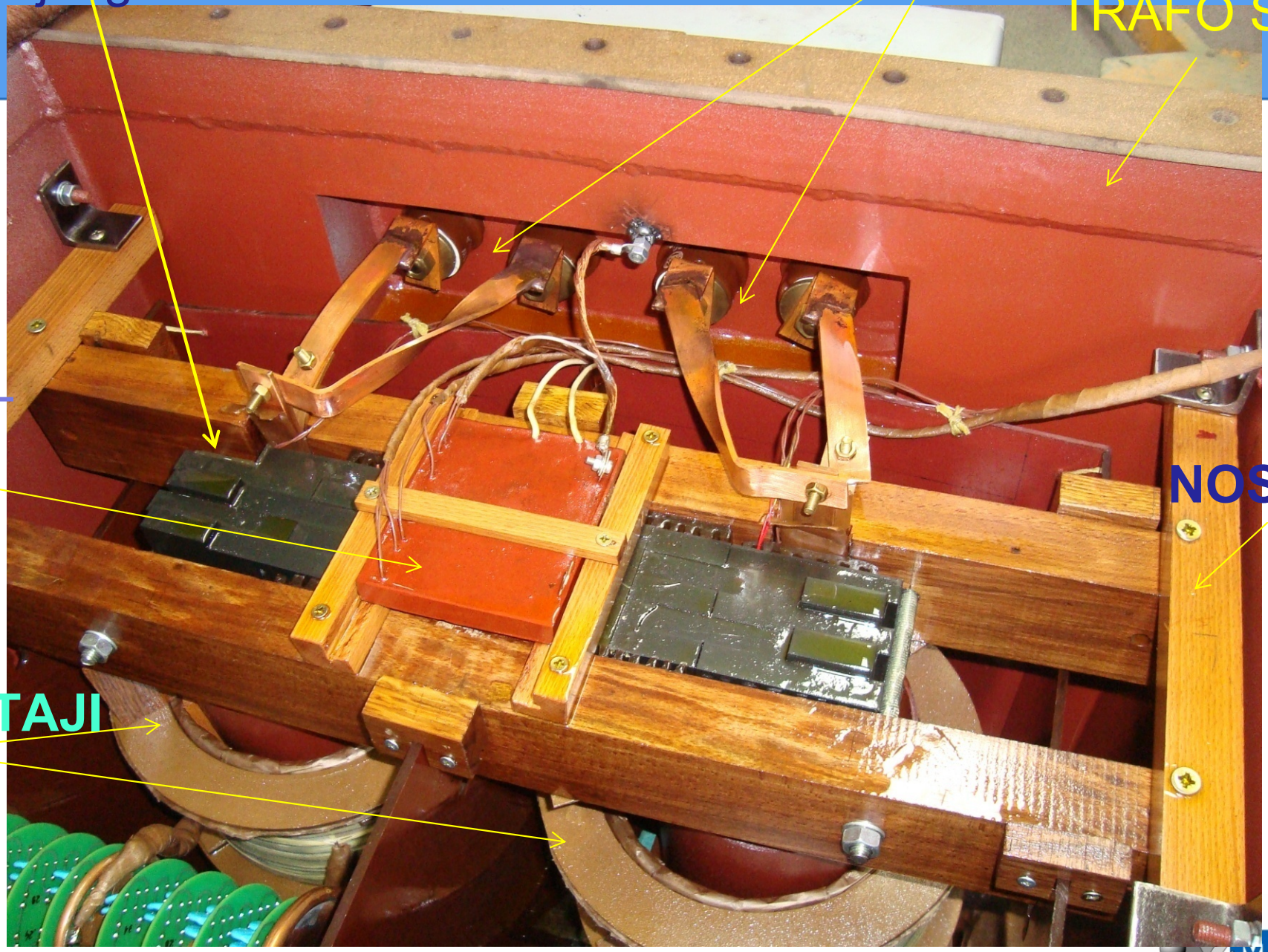


Izgled VNVF transformatora 60kVA pre stavljanja u izolacioni medijum od ulja



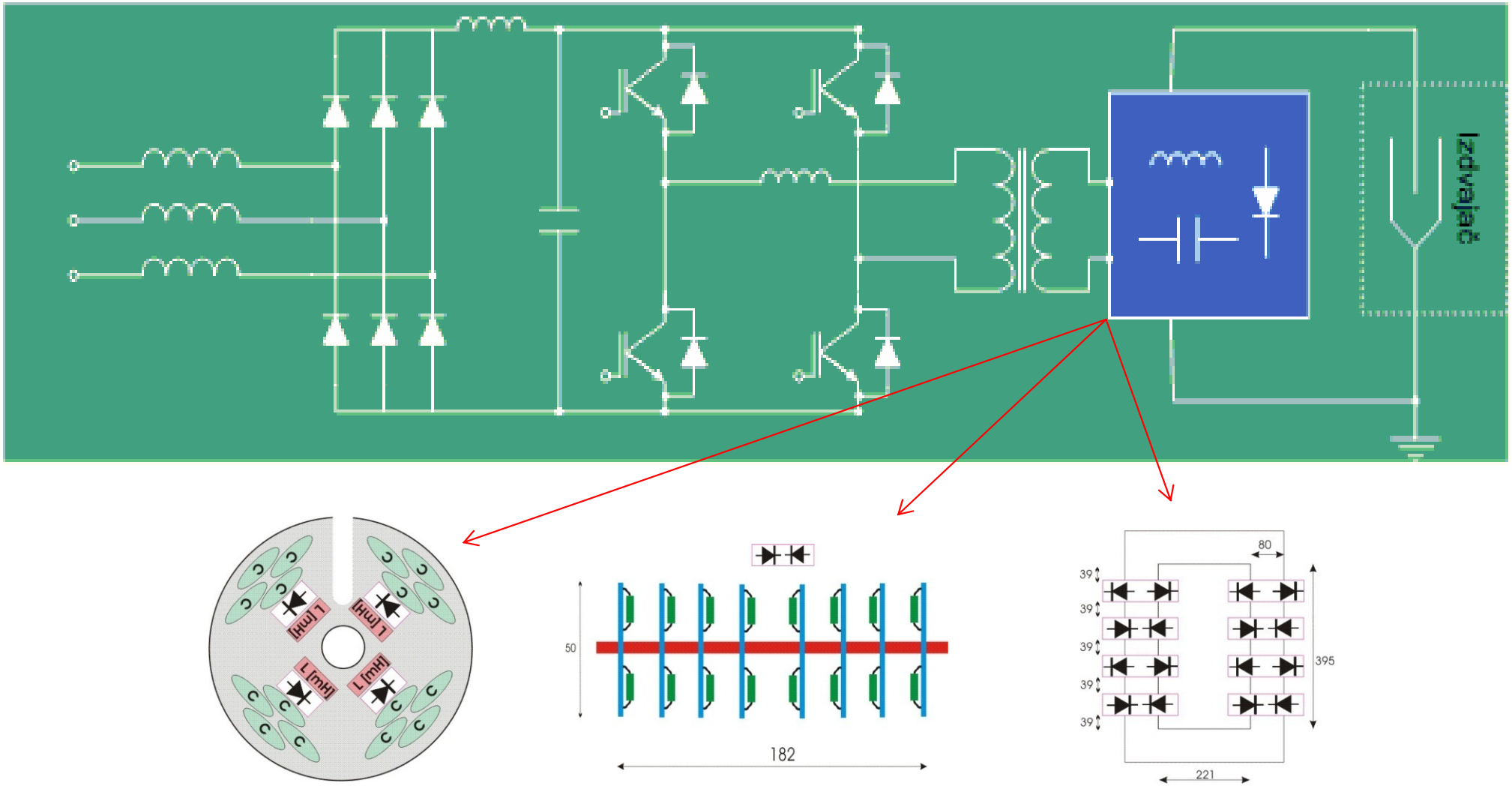
Izgled VNVF transformatora 60kVA + VN ispravljača nakon postvaljanja u transformatorski sud

MAGNETNO KOLO-Kompozicija feritnih jezgara



institut MIHAJLO PUPIN

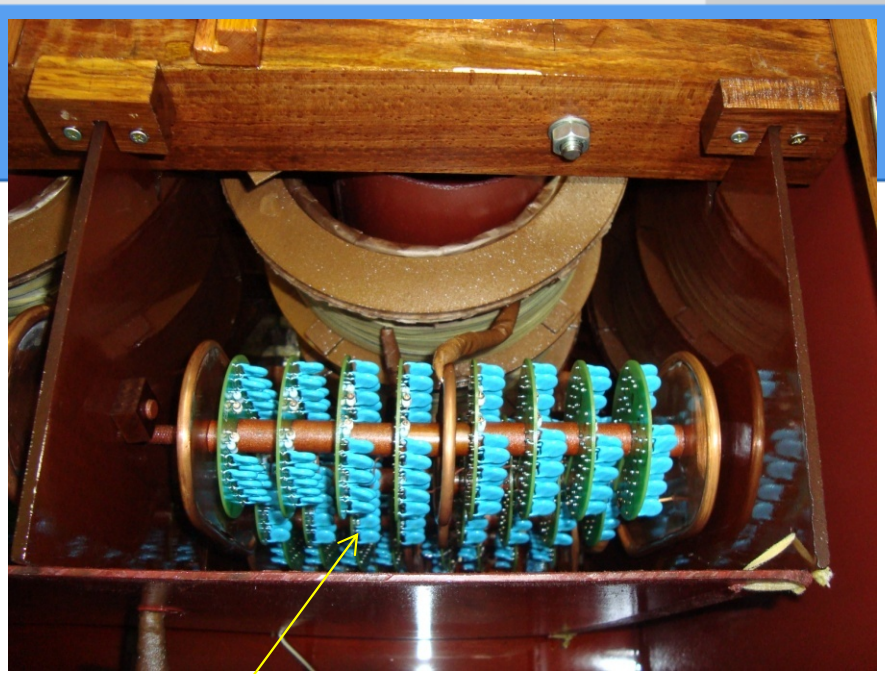
TOPOLOGIJA MULTI-REZONANTNOG VNVF NAPAJANJA AR70 (100)/1000

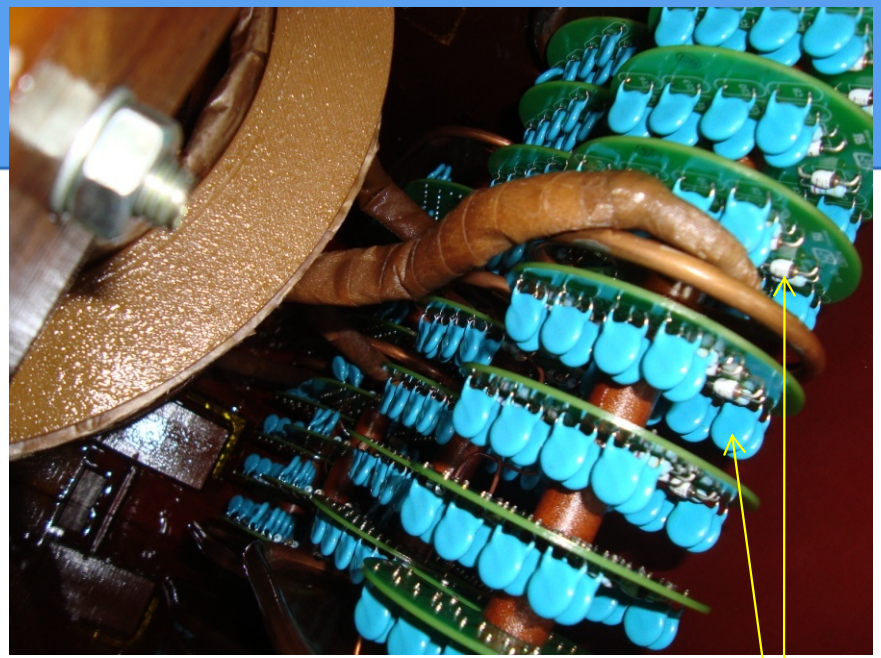


3x400V, 50Hz / 70kV (100kV) DC, 1000mA

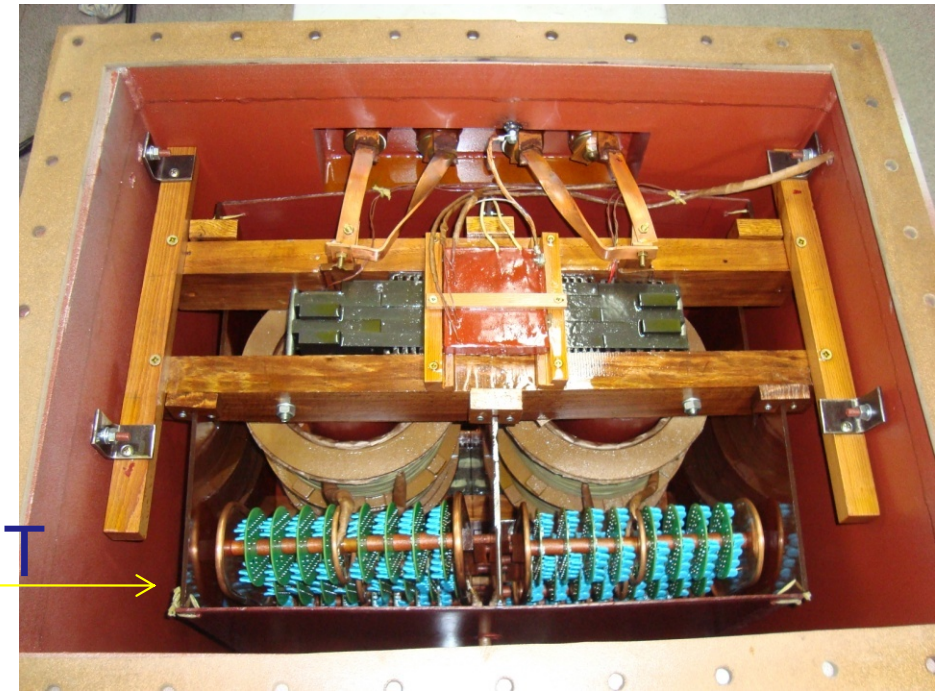
institut MIHAJLO PUPIN

IZGLED VN DIODNOG MOSTA





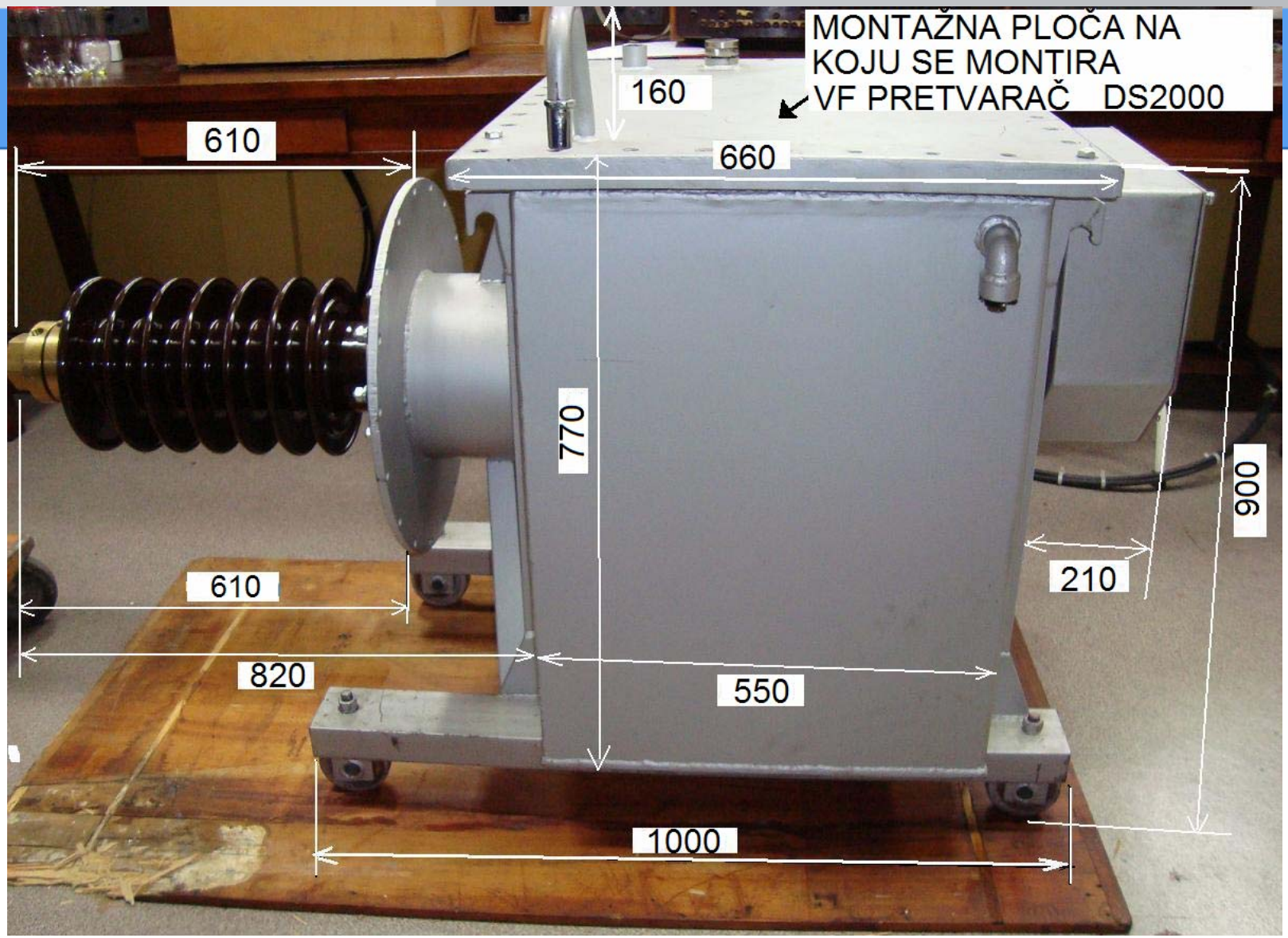
½ VN DIODNOG MOSTA



VN DIODNI MOST

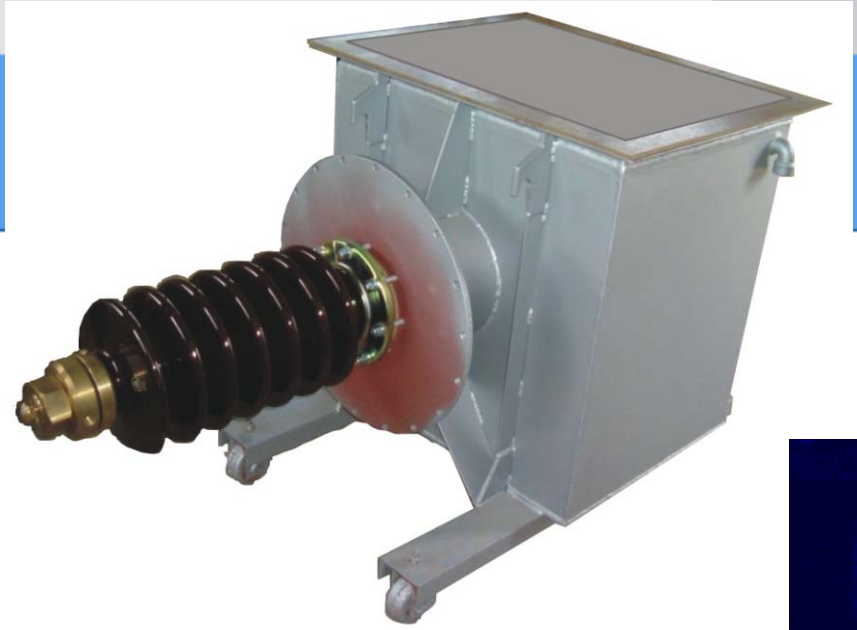
DIODNI RC članovi za ujednačenje napona

IZGLED VNVF ISPRAVLJAČA AR 70/1000



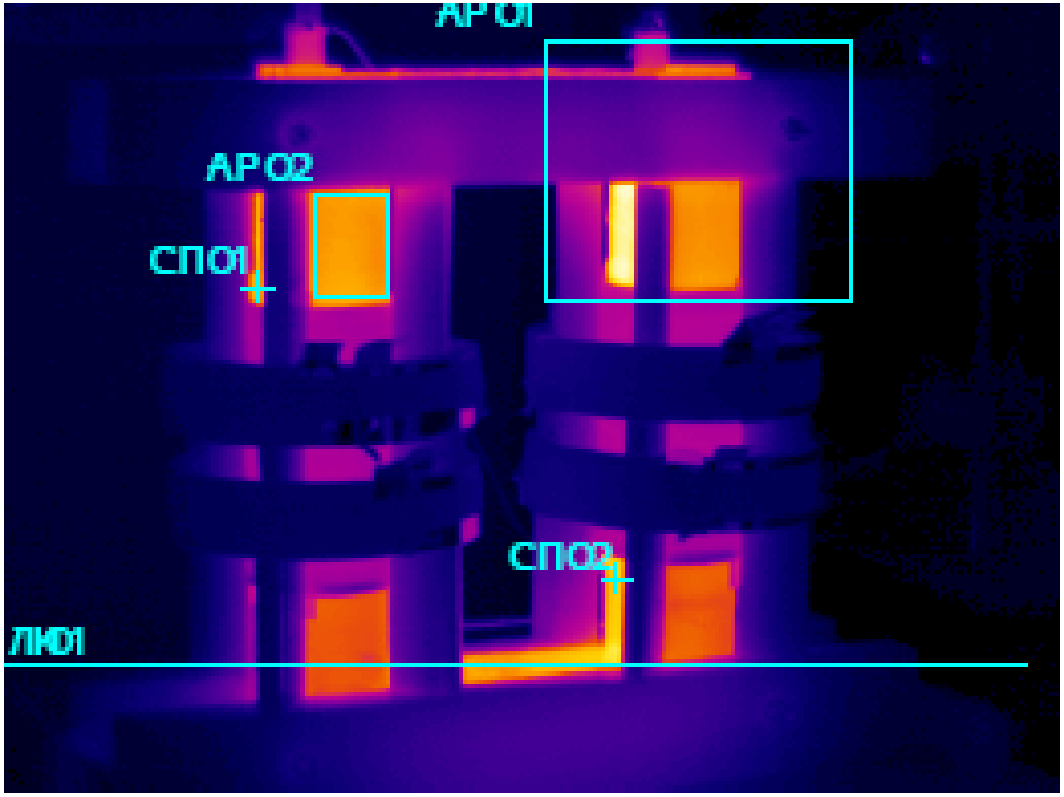
Izgled i dimenzije suda ispunjenog transformatorskim ujem u kojem su smešteni VNVF transformator i VN ispravljač;prividna snaga uređaja S=60kVA;date dimenzije su u milimetrima

institut MIHAJLO PUPIN



Izgled uređaja AR70/1000

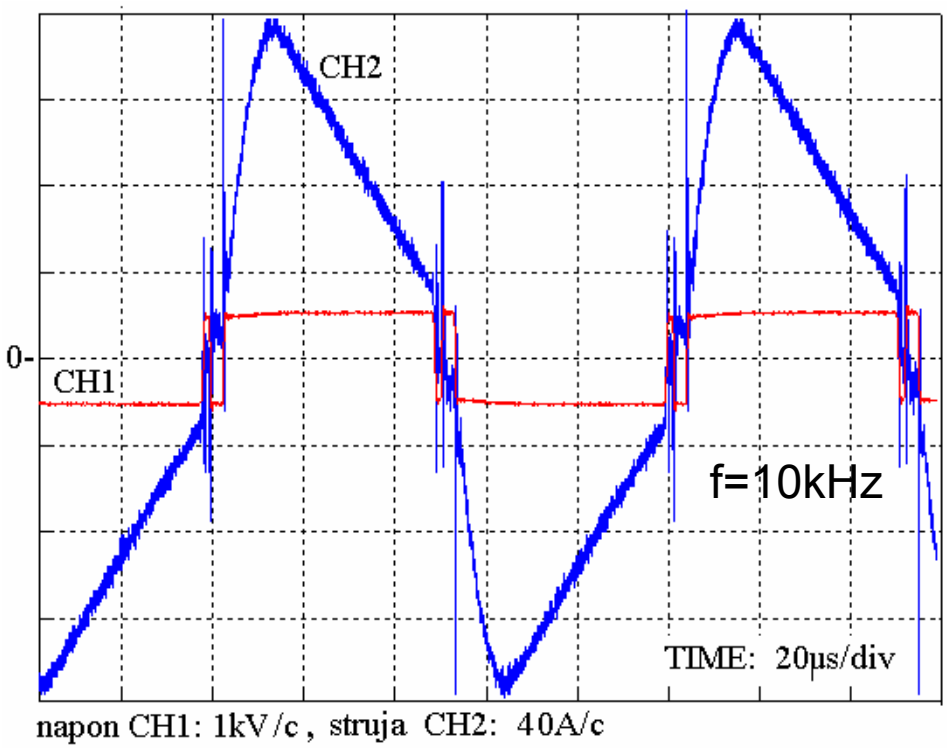
3x400V, 50Hz/ 70kV DC , 1000mA



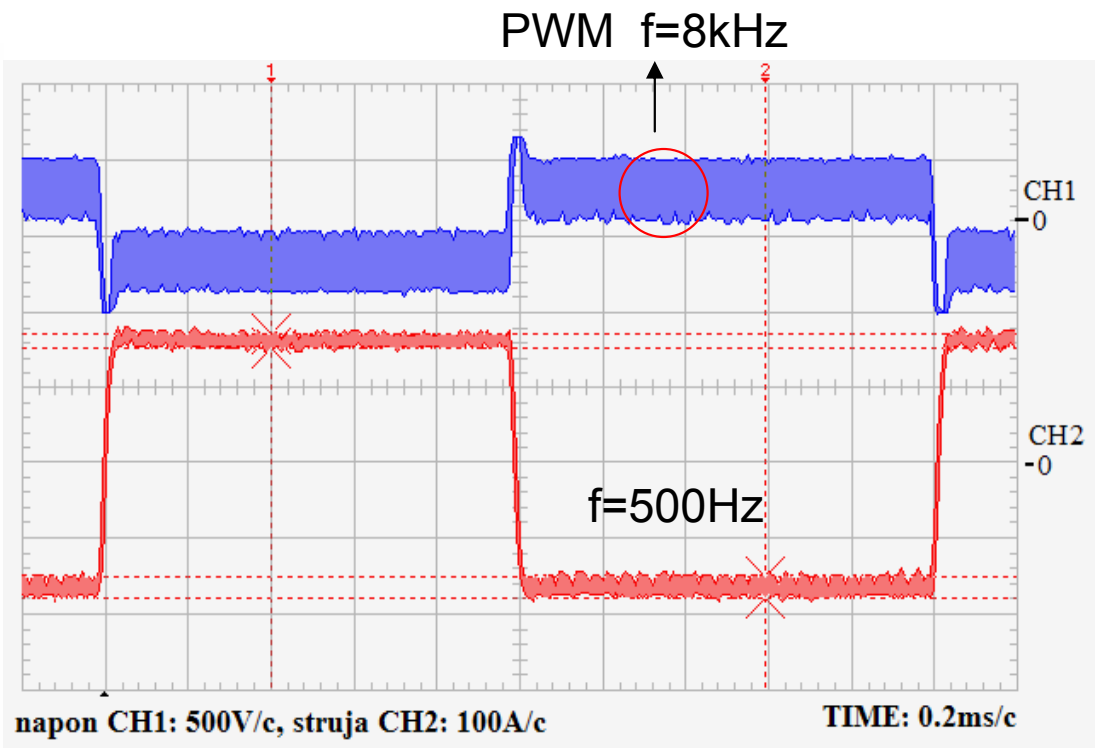
Raspodela temperature u feritnom jezgru dobijena termovizijskom kamerom

PREKIDAČKA EFIKASNOST MULTI REZONANTNE TOPOLOGIJE

Energetski efikasniji režim prekidanja pri maloj struji primara (10-20A) u odnosu na slučaj retrofitnog napajanja, kada se prekidanje ostvaruje pri značajnoj struji od 150A



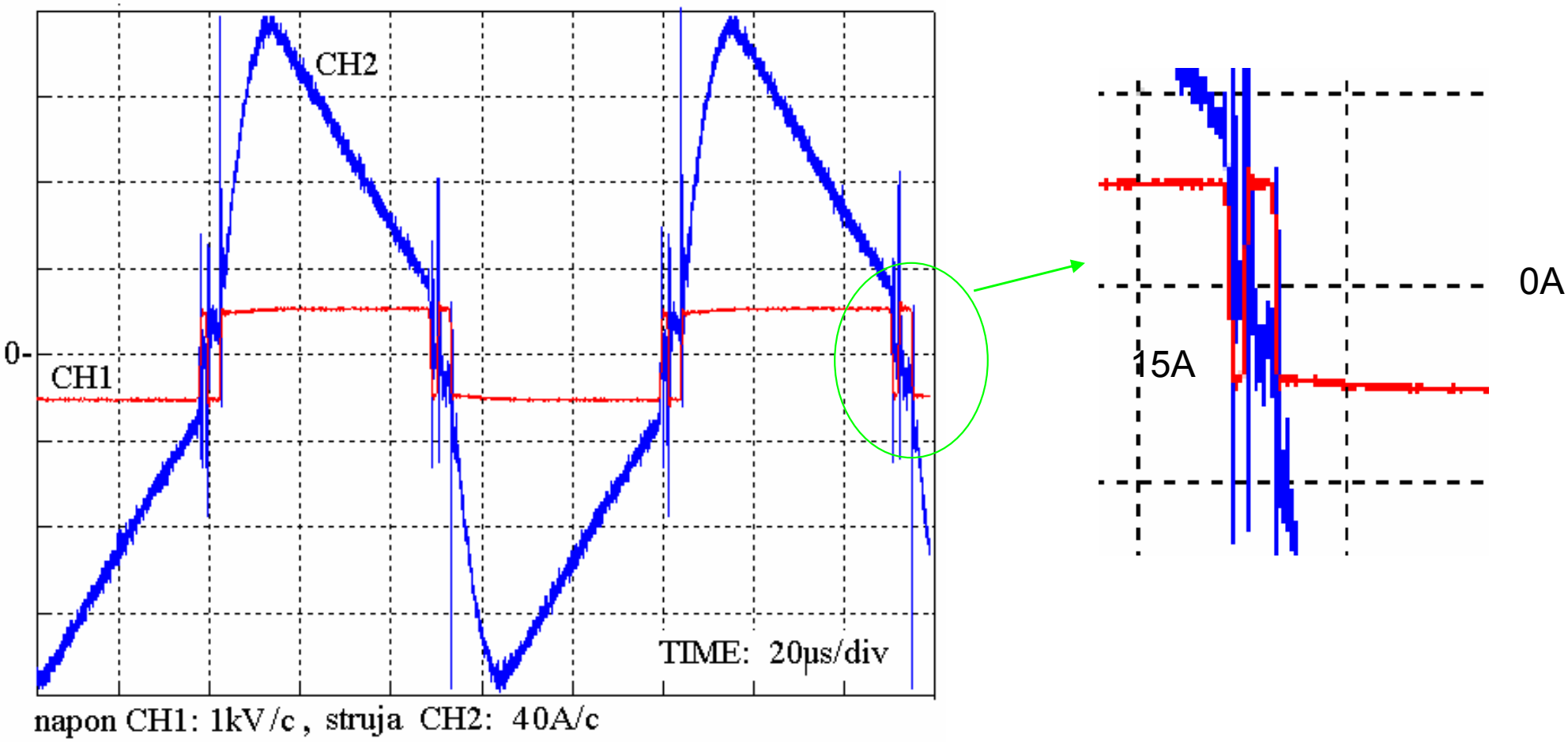
Snimci napona i struje primara transformatora multi-rezonantnog VF napajanja pri punom opterećenju; Uo=100kV, Io=1A



Snimci napona i struje primara 50Hz-nog transformatora retrofitnog napajanja pri punom opterećenju; Uo=100kV, Io=1A

institut MIHAJLO PUPIN

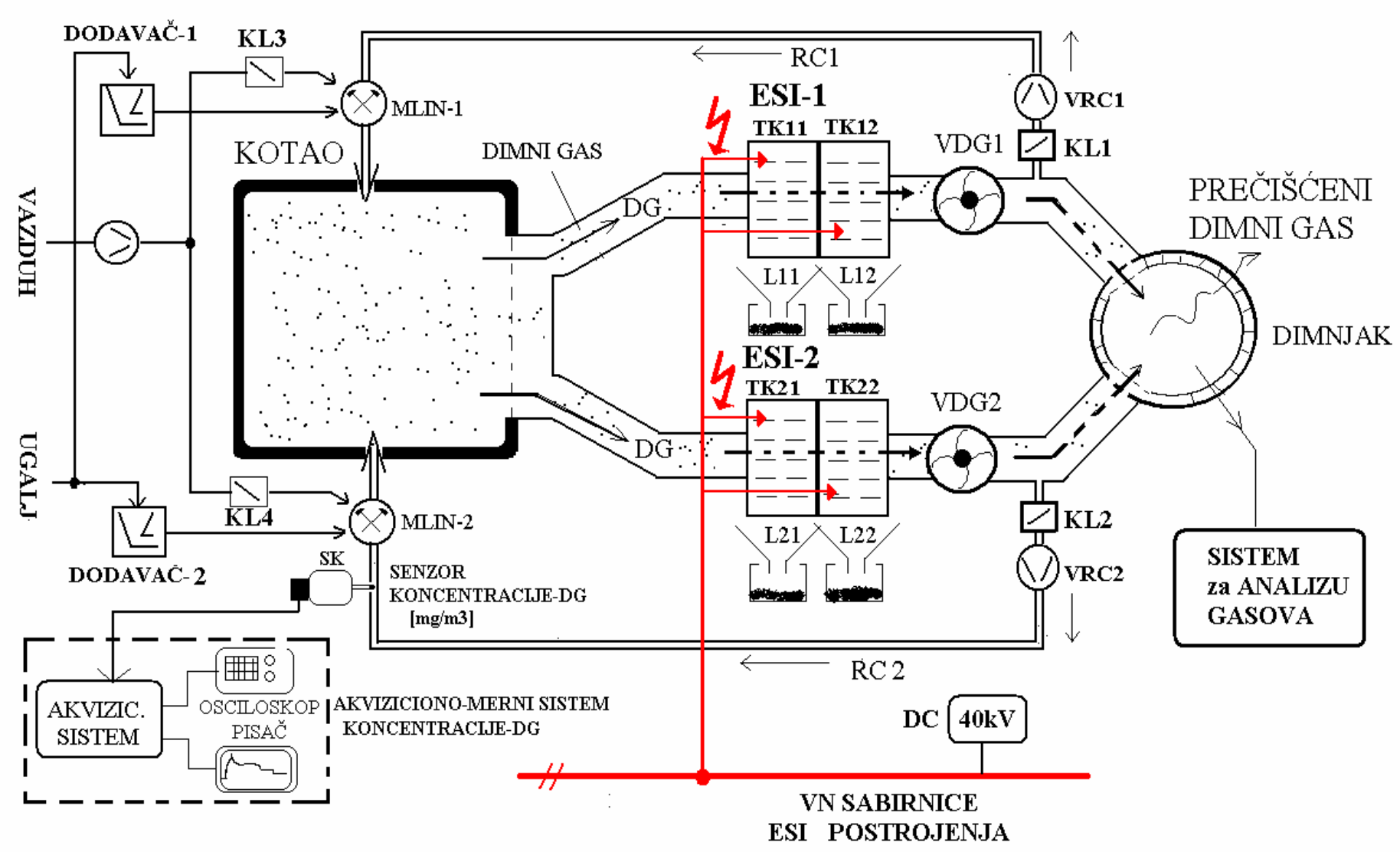
Prekidanje pri maloj struji značajno povećava energetsku efikasnost multi-rezonantne topologije



POBOLJŠANJA KOJE NUDI VF NAPAJANJE

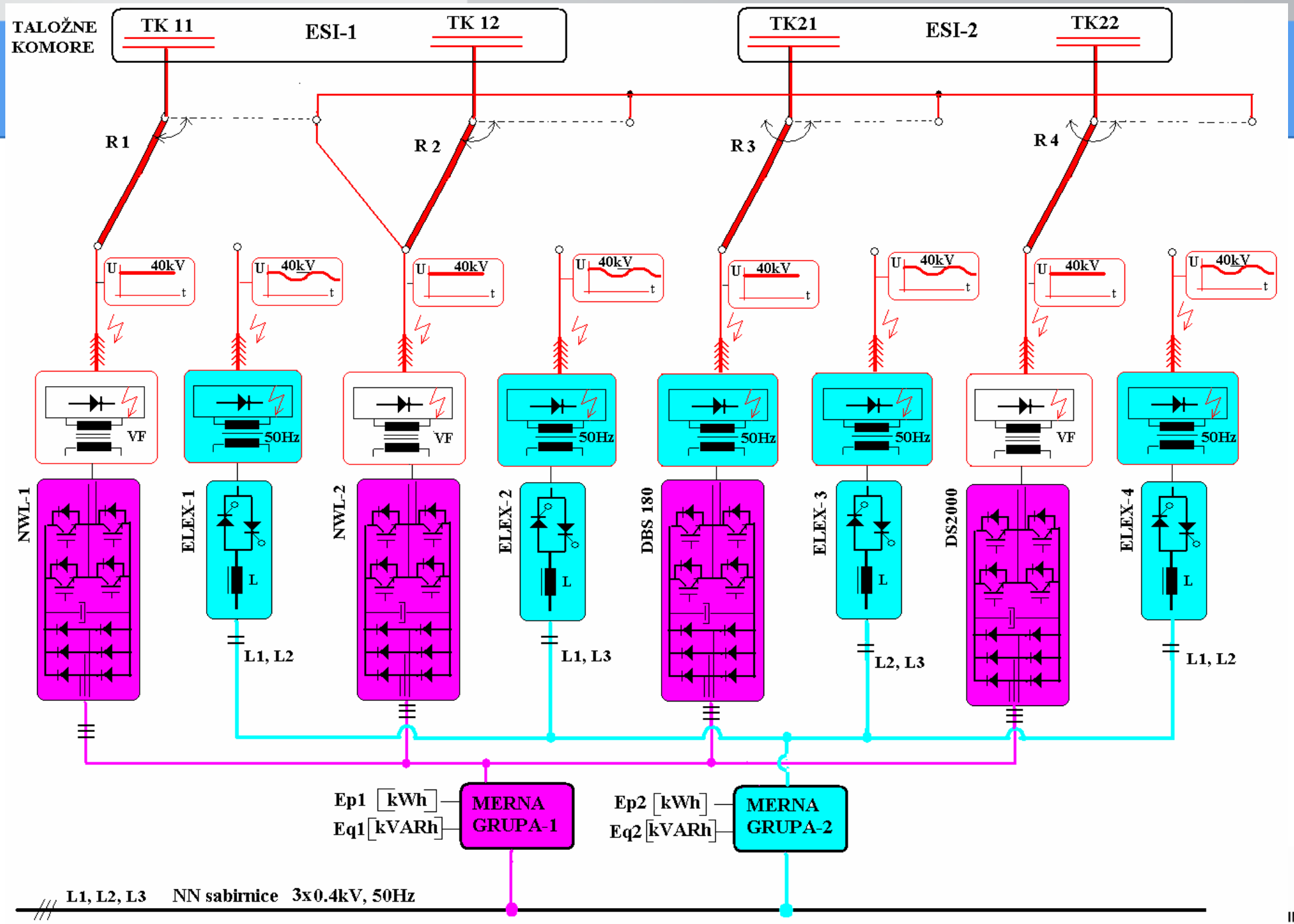
- Mnogo ***precizniju kontrolu* radnih parametara** ESI (kao što su napon i struja), od konvencionalnog 50Hz-*nog*
- ***Znatno brži porast napona*** ESI i *znatno brži odziv* na promene opterećenja u odnosu na konvencionalno 50Hz-*no*g
- Visoka učestanost obezbeđuje ***značajno smanjenje veličine i težine*** 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-blok šema postrojenja ESI na TE "Morava"



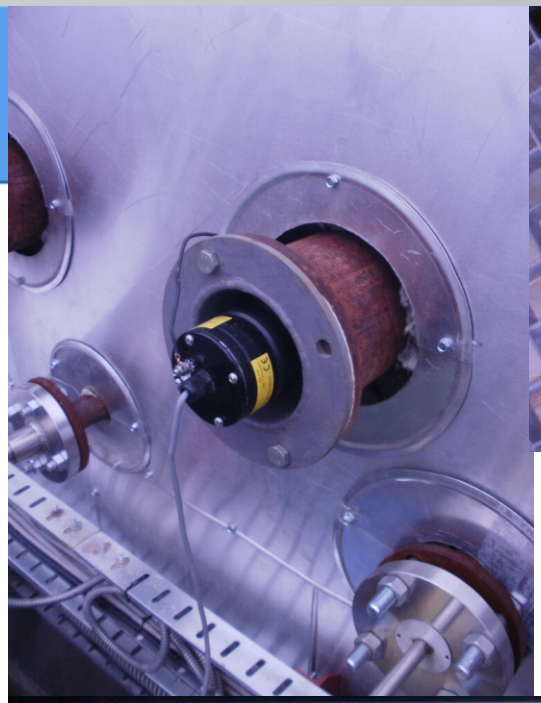
institut MIHAJLO PUPIN

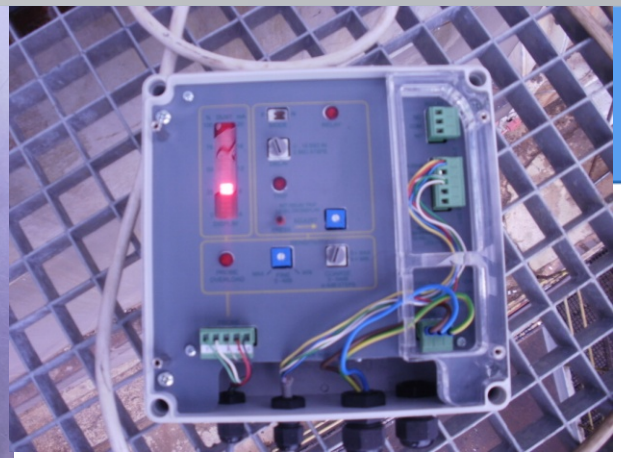
VN razvod ESI postrojenja na TE “Morava”



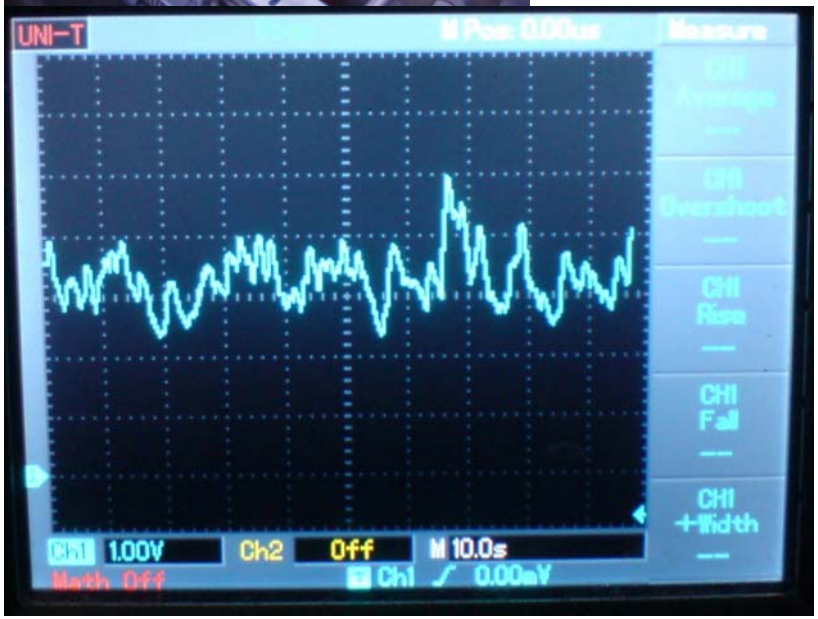
IN

DISPOZICIJA UGRAĐENE MERNE OPREME

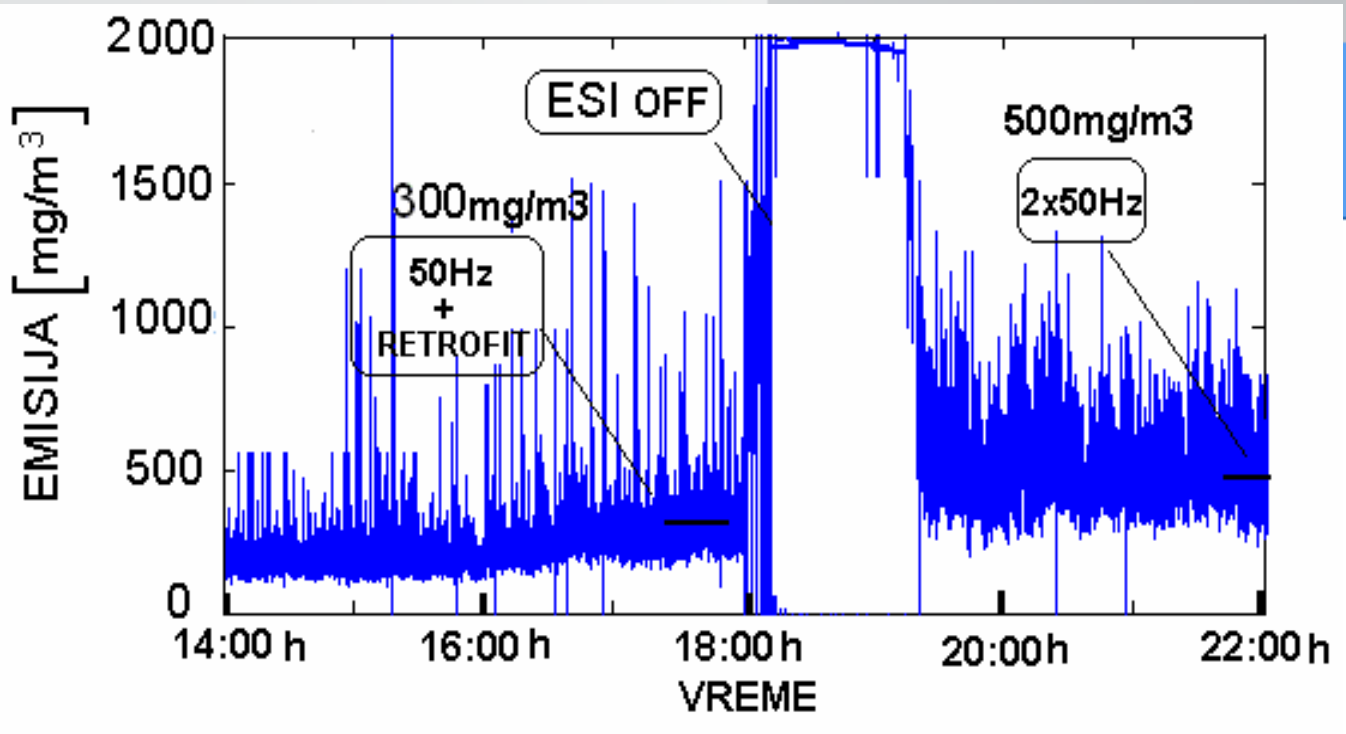




Merni sistem KONCENTRACIJE ČESTICA opseg 0-2000mg/m³



institut MIHAJLO PUPIN



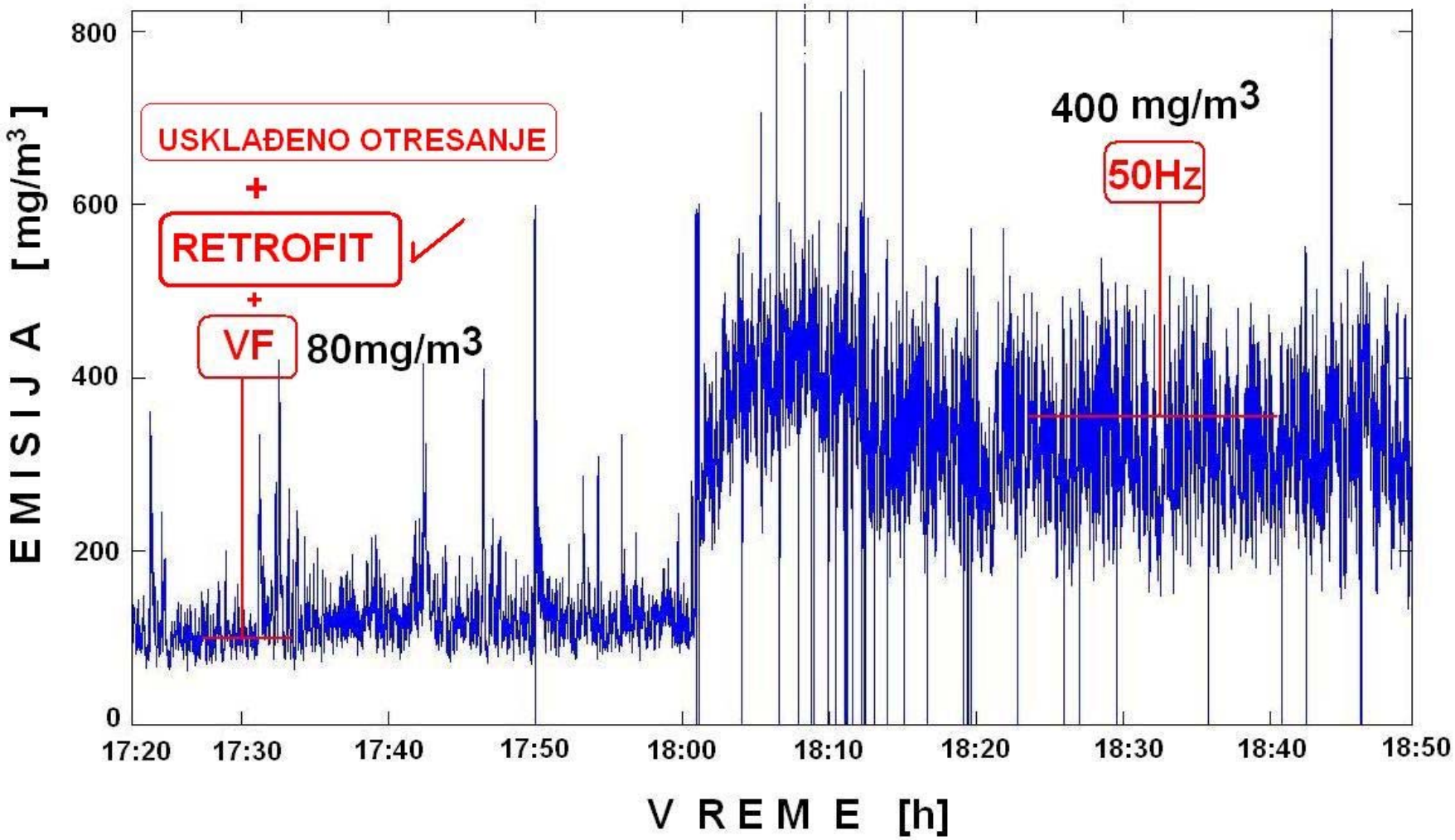
Poređenje emisije dimnog gasa u recirkulacionom vodu elektrofiltarskog postrojenja na TE "Morava".

(a)-hibridno napajanje (b)-50Hz-no napajanje

•Emisija čestica za interval vremena od 8h u toku koga su logovani podaci u recirkulacionom vodu postrojenja ESI na TE "Morava".
•U ovom interval je blok radio sa približno konstantnom snagom od oko 90MW i sa približno istim kvalitetom uglja.
•Merenja su obavljena za tri karakteristična slučaja napajanja desne grane filtarskog postrojenja na TE "Morava": 50Hz+retrofit, isključeno napajanje, 2x50Hz.
•Uočava se da je u prvom slučaju (50Hz+retrofit) izlazna koncentracija 300mg/m³, dok je u slučaju napajanja 2x50Hz oko 500mg/ m³.
•Pri isključenom napajanju dostignut je limit mernog sistema (2000mg/m³).

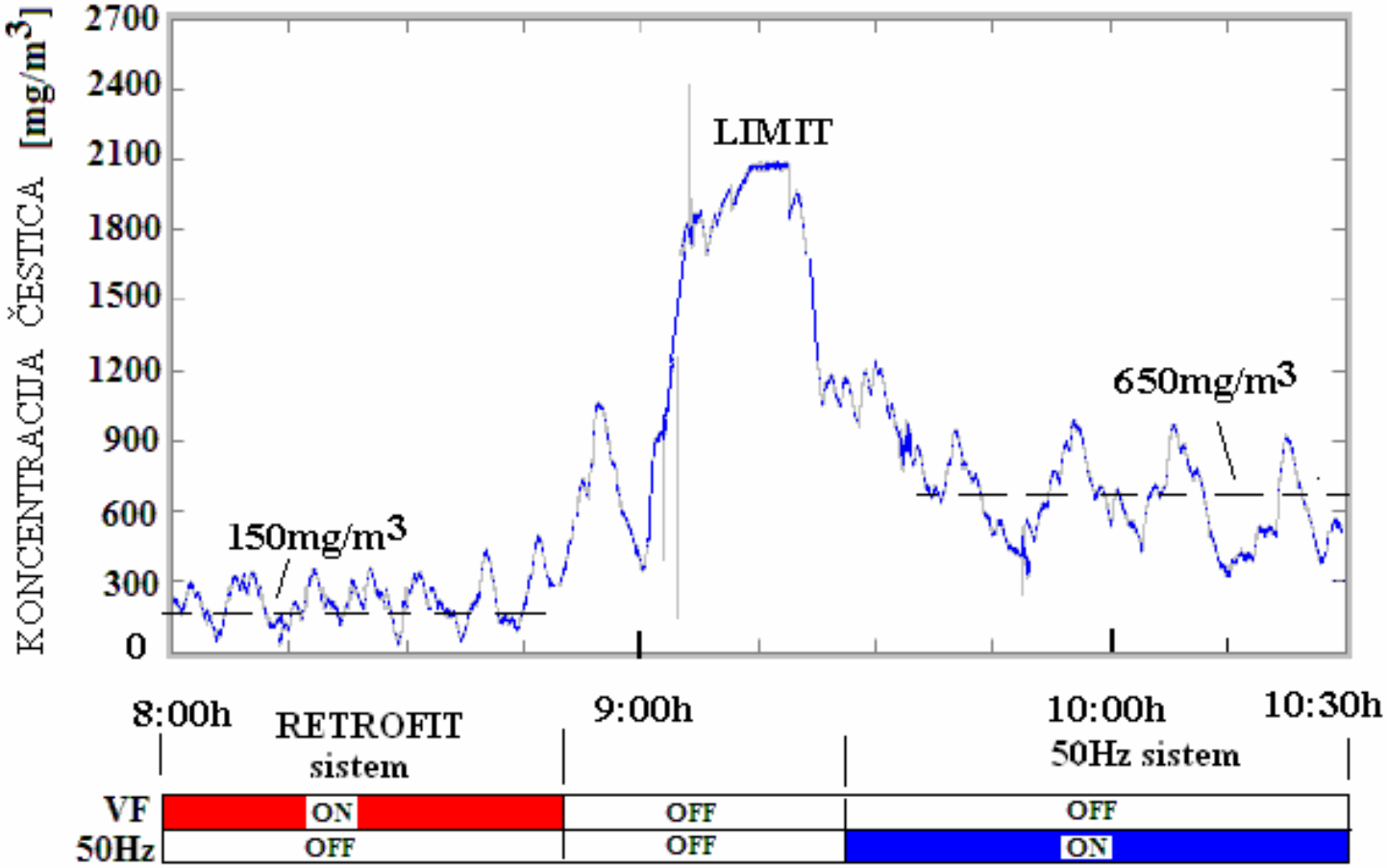
institut MIHAJLO PUPIN

REZULTAT DOBIJEN SA USKLJAĐIVANJEM ELEKTROSTATIČKOG IZDVAJANJA I OTRESANJA



institut MIHAJLO PUPIN

Poređenje emisije dimnog gasa u recirkulacionom vodu elektrofiltarskog postrojenja na TE "Morava"

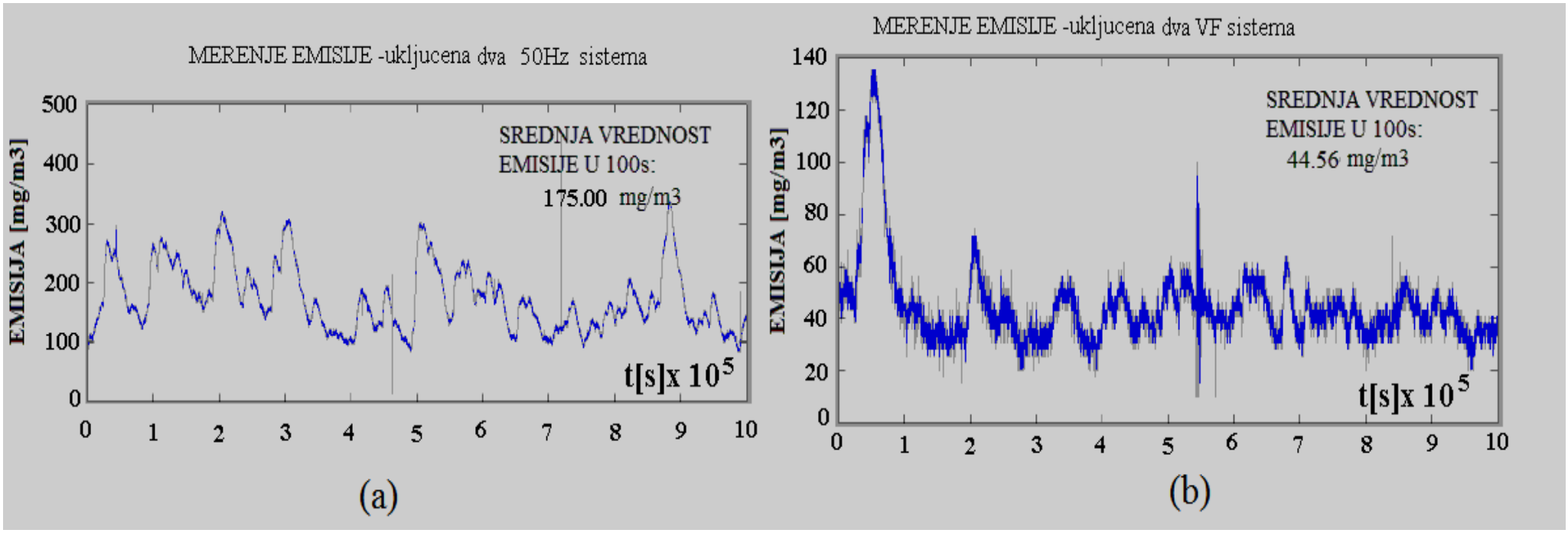


Merenja obavljena za tri karakteristična slučaja napajanja desne grane ESI postrojenja na TE "Morava": **2xretrofit, isključeno napajanje, 2x50Hz**

PROJEKTOVANA VREDNOST ESI POSTROJENJA (1970 god) NA TE "MORAVA" je 200mg/m³ !!!!!!!!

institut MIHAJLO PUPIN

Merenje emisija i poređenje 50Hz-nih VNVF sistema



Izmerene vrednosti koncentracije na TE “Morava”
(a) 50Hz-ni sistem , (b) VF sistem

VIZUELNO PRAĆENJE

(a) (b) (c)

(a)-VF napajanje, 50mg/m³, (b)-isključeni ESI, (c)- 50Hz-no napajanje, 150mg/m³

REALIZOVANI PROJEKTI

- Eksperimetalna potvrda rada RETROFITNOG NAPAJANJA, VNVF MULTIREZONTNOG NAPAJANJA, predloženih načina upravljanja i merenje efikasnosti čišćenja su ostvareni na realnom pilot postrojenju ESI na TE "Morava„ u perodu 2008-2010.
- Realizacija ovog projekta je finansirana delom od strane Ministarstva za nauku Republike srbije u okviru **Projekta tehnološkog razvoja ZS-21007- *" Razvoj i primena visokonaponske visokofrekventne ekološke opreme za otklanjanje aerozagađenja u industriji i elektroprivredi„* za period 2007-2010,** a delom od strane P.D. TENT- Obrenovac.

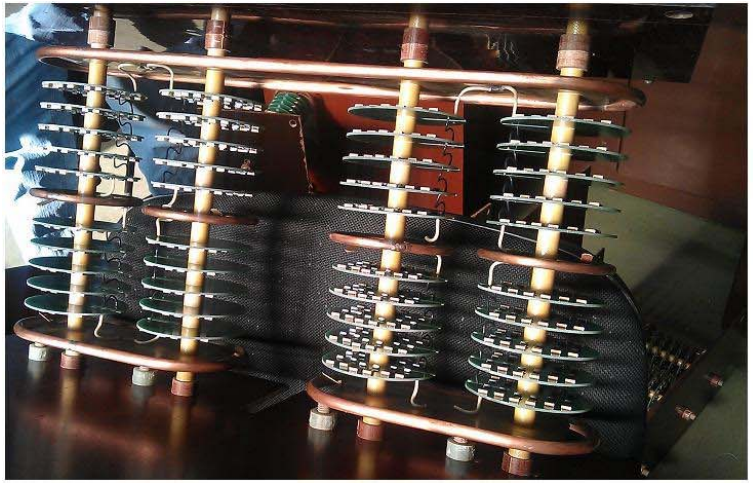
institut MIHAJLO PUPIN

REZULTATI PROJEKTA ZS21007

- U okviru ovog projekta su razvijena i praktično realizovana tri tipa VF napajanja taložnih elektroda na ESI postrojenu u TE "Morava" (IGBT VF rezonantno napajanje x2, IGBT VF napajanje sa naponskom PWM kontrolom x1, strujno kontrolisani VF IGBT pretvarač u kombinaciji sa postojećim 50Hz-nim transformatorima tzv. *retrofit* napajanje).
- Novi VF upravljački sistem ESI je rezultovao dvostruko manjim vrednostima emisija čestica dima i čađi na izlaznom dimnjaku postrojenja i značajnim poboljšanjem kvaliteta vazduha u Svilajncu što su nadležni organi izmerili i dokumentovali
- U okviru razvoja nove VF tehnologije postignute su značajne uštede električne energije i postignut je rezultantni faktor snage postrojenja blizak jedinici;implementirano je intermitentno upravljanje čime se uvećavaju efekti taloženja i ostvaruje smanjenje gubitka snage
- Značajno je povećana pouzdanost, redundantnost i fleksibilnost realizovanog VF postrojenja u odnosu na postojeće 50Hz-no

Izgled najnovije razvijenog VNVF uređaja AR100/1000

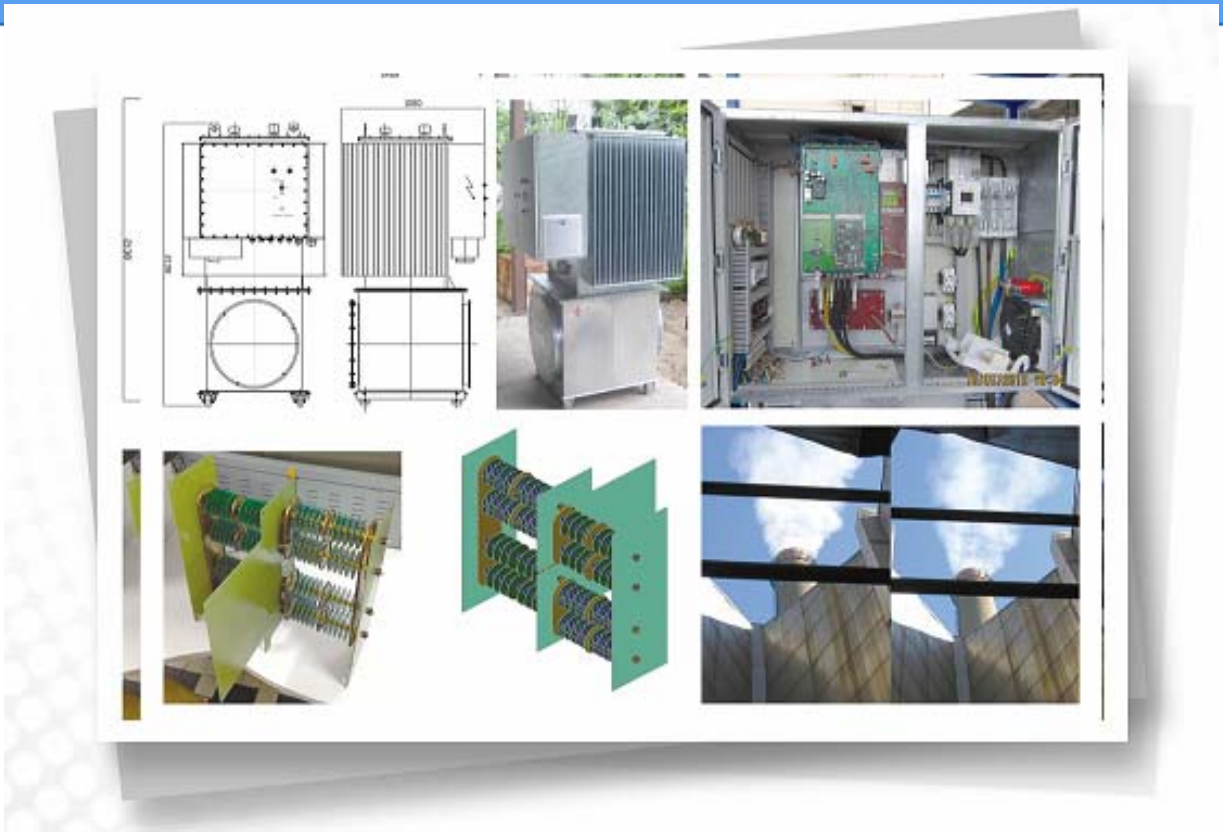
VN
ispravljač



VN
Izlaz
100kVDC
/1A

institut MIHAJLO PUPIN

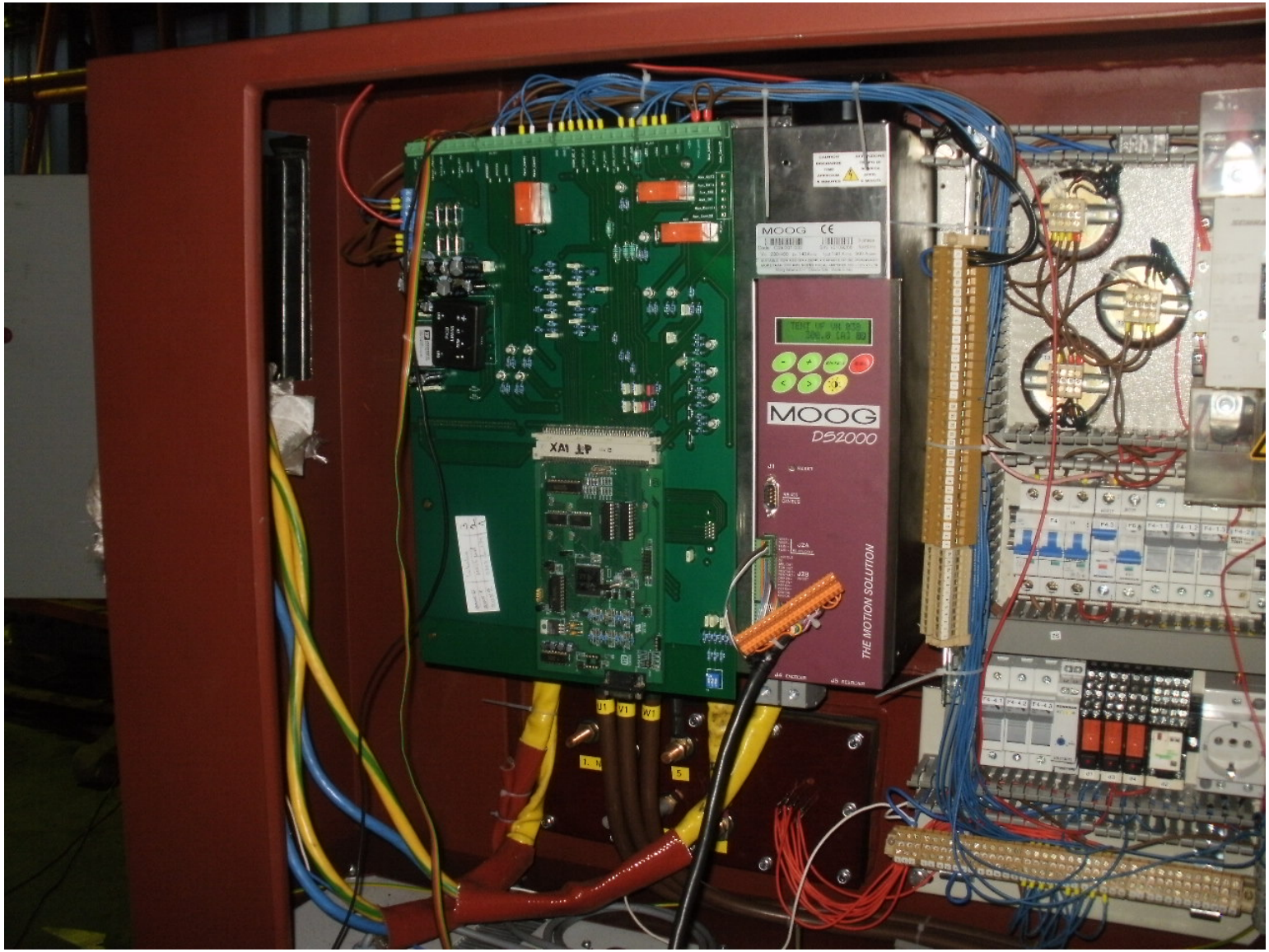
PROJEKAT TR33022 je USTVARI KRUNA ISTRAŽIVANJA u okviru kojeg je razvijeno DOMAĆE VNVF napajanje AR100/1000



Poređenje eksploatacionih karakteristika VF sistema i tiristorskih 50Hz-nih sistema napajanja u kontroli ESI su sadržani u rezultatima istraživanja na Projektu **TR33022,** Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije: ***"Integrisani sistemi za uklanjanje štetnih sastojaka dima i razvoj tehnologija za realizaciju termoelektrana i energana bez aerozagađenja"***, u okviru programa istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 01.01.2011-31.12.2015.

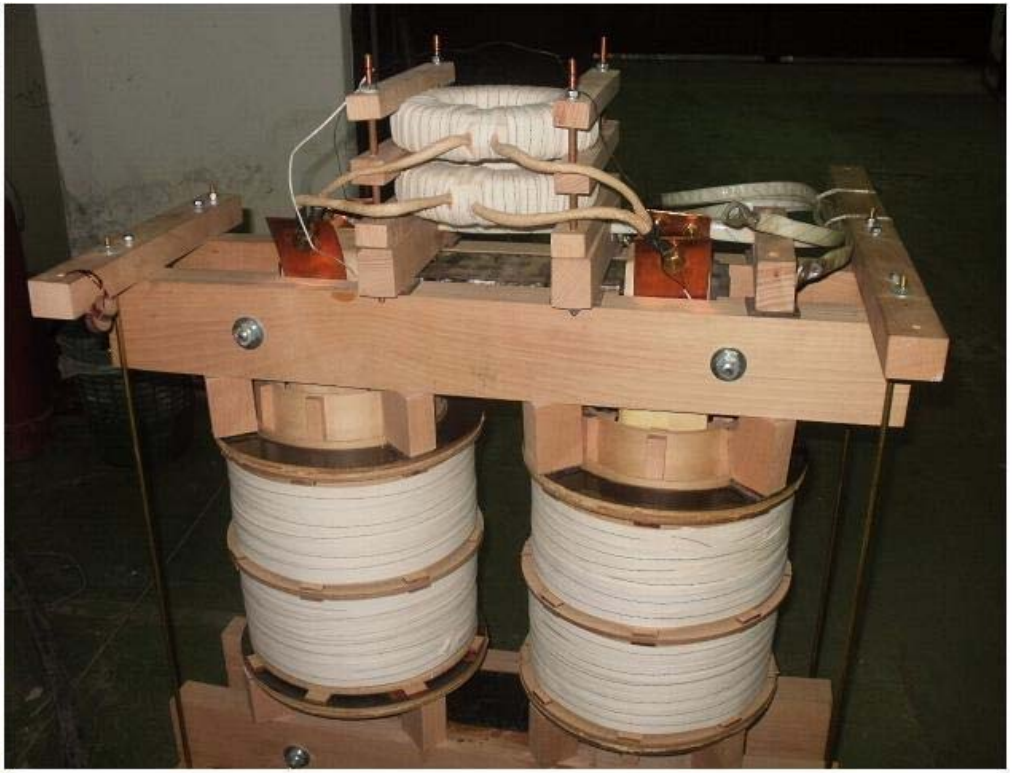
institut MIHAJLO PUPIN

Energetski pretvarač i DSP upravljački uređaj u sklopu napojne jedinice AR100/1000



institut MIHAJLO PUPIN

Izgled VNVF transformatora u sklopu uređaja AR100/1000



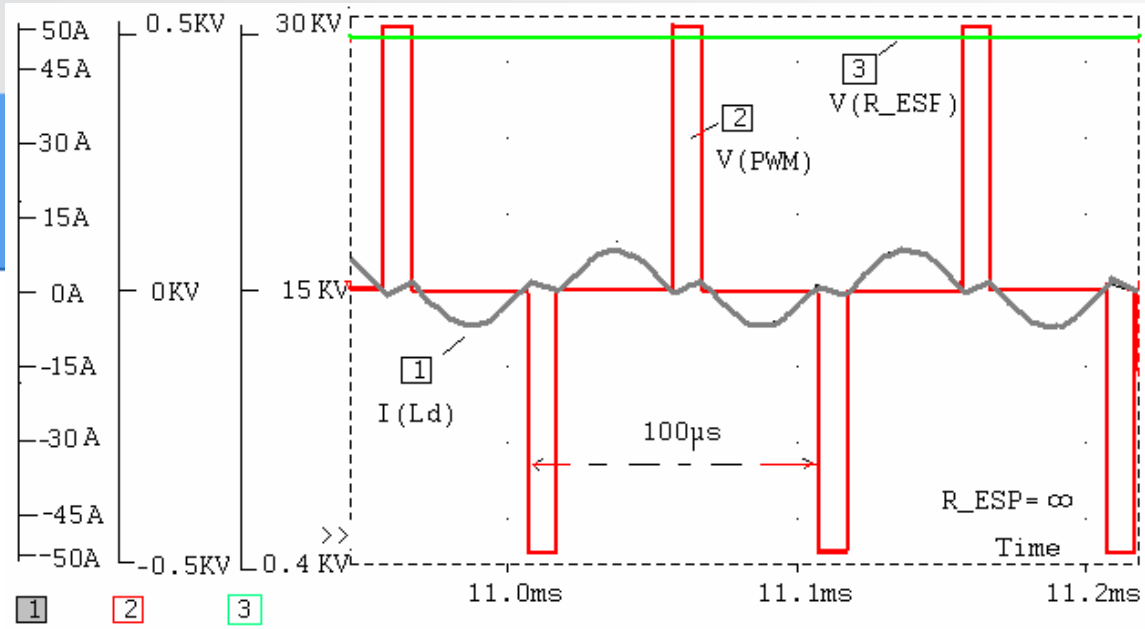
VNVF transformator podizač napona 0.4kV/100kV, sa feritnim jezgrom, snage 100kW, radne učestanosti 10kHz

institut MIHAJLO PUPIN

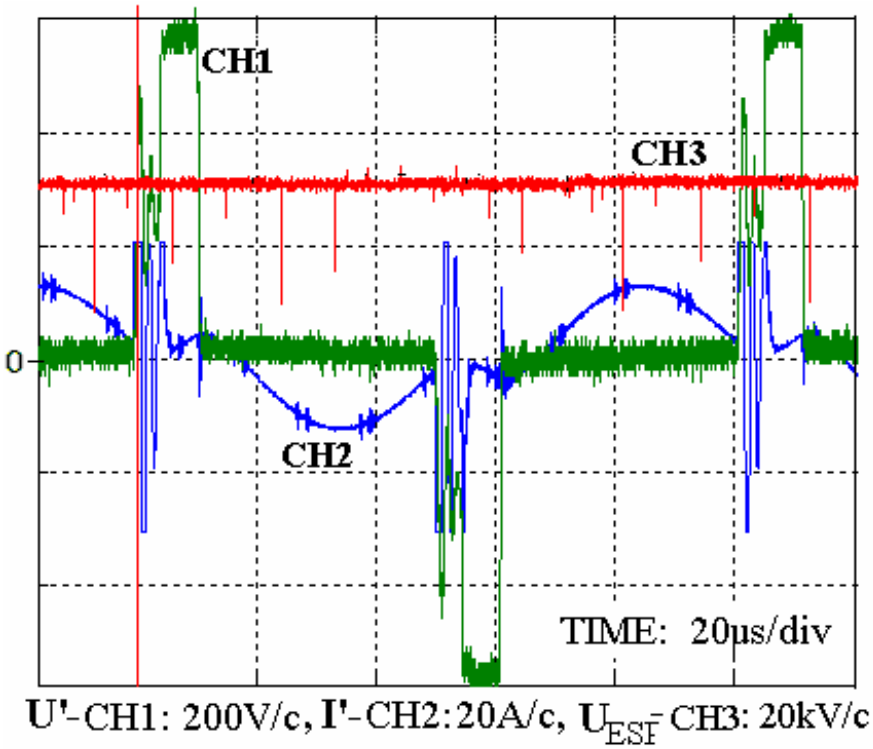
NEKI TEHNIČKI PODACI ZA TRANSFORMATOR VNVF NAPAJANJA

Prenosni odnos VNVF transformatora	1:120
Primarni napon	600V
Sekundarni napon	100kV
Učestanost	2-10kHz
Napon kratkog spoja	10%
Struja primara	200A
Struja sekundara	1.3A

IZLAZNI NAPON I STRUJA IGBT PRETVARAČA VNVF JEDINICE i IZLAZNI NAPON VNVF JEDINICE
Režim: PRAZAN HOD- 30kV



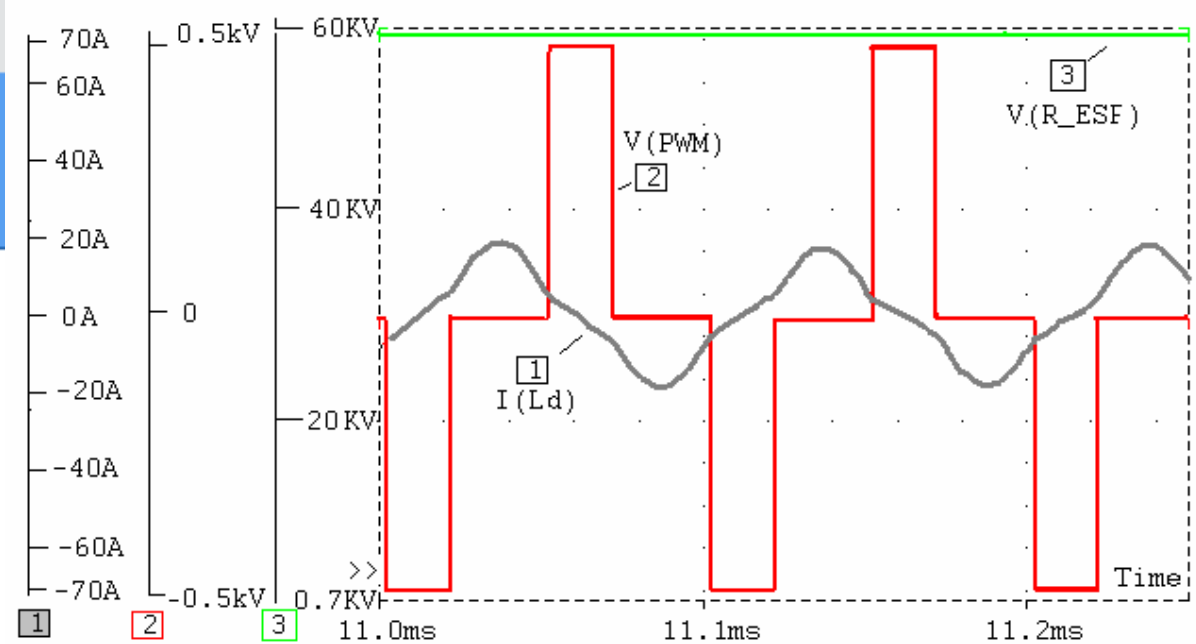
Simulacioni rezultat za kolo multirezonatne topologije , Prazan hod ;
δ=12.5%, V_{ESF}=30kV



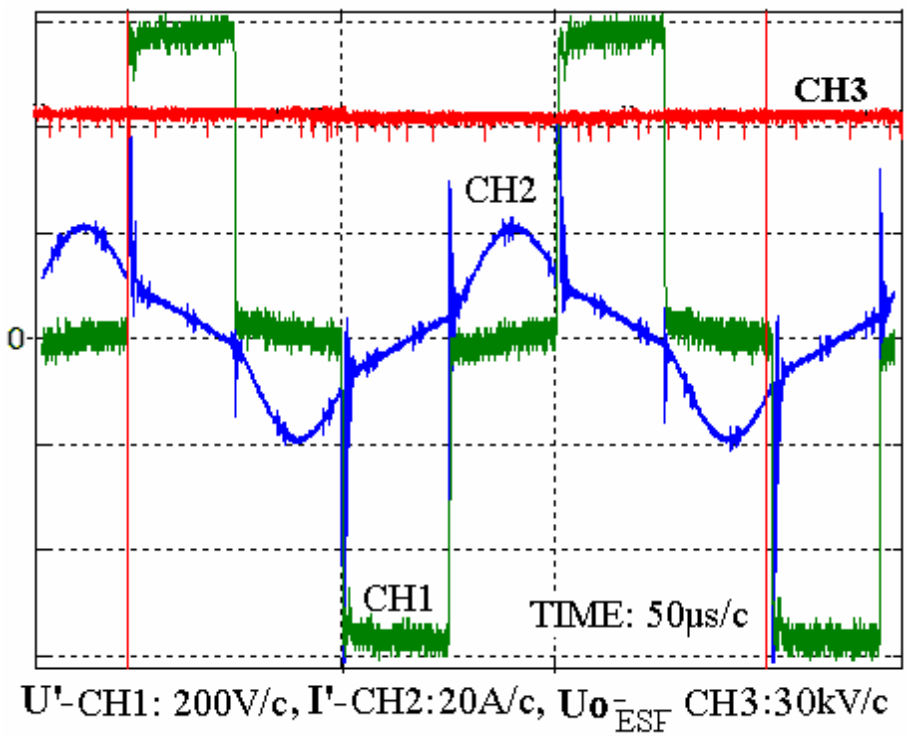
Stvarni osciloskopski snimci izlaznog napona (CH1) i struje (CH2) IGBT pretvarača; izlazni napon VNVF jedinice (CH3), U_{ESF}=30kV. Širina naponskih impulsa 10µs.

institut MIHAJLO PUPIN

IZLAZNI NAPON I STRUJA IGBT PRETVARAČA VNVF JEDINICE i IZLAZNI NAPON VNVF JEDINICE
Režim: PRAZAN HOD- 60kV



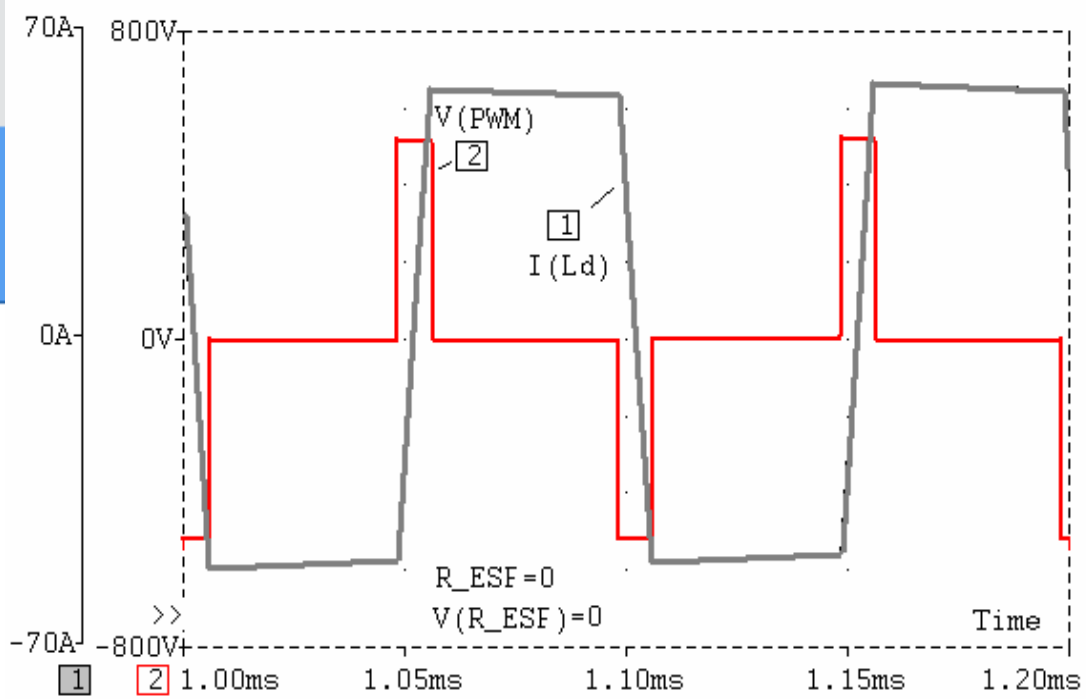
Simulacioni rezultat za kolo multirezonatne topologije , Prazan hod ;
δ=25%, V_{ESF}=60kV



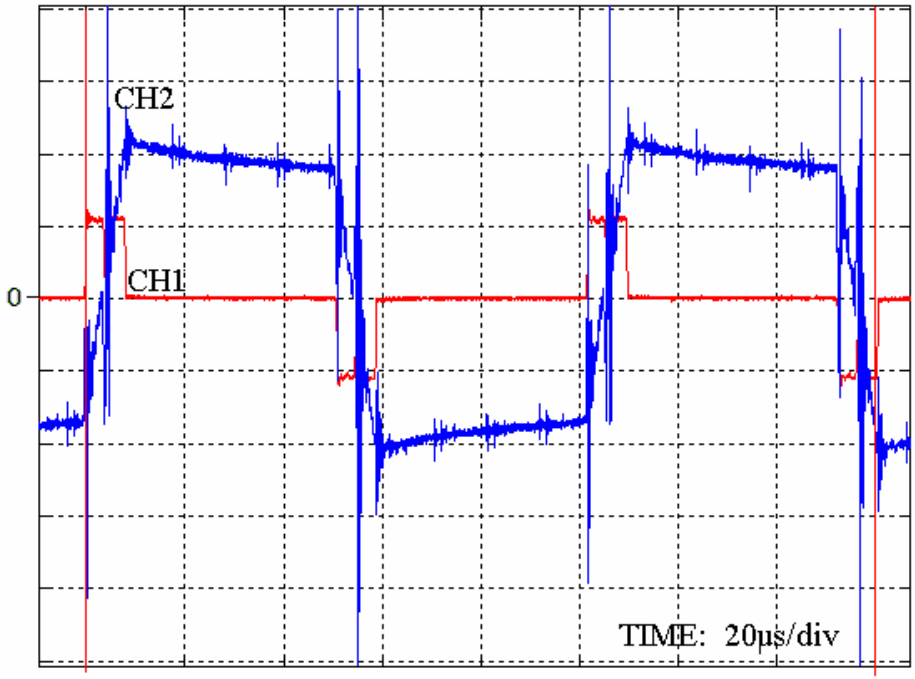
Stvarni osciloskopski snimci izlaznog napona (CH1) i struje (CH2) IGBT pretvarača; izlazni napon VNVF jedinice (CH3), UESF=60kV. Širina naponskih impulsa 50µs.

institut MIHAJLO PUPIN

IZLAZNI NAPON I STRUJA IGBT PRETVARAČA VNVF JEDINICE
Režim: KRATAK SPOJ



Simulacioni rezultat za kolo multirezonatne topologije , pri kratko spojenim izlaznim krajevima na opterećenju; *δ=15%, VESF=60kV*

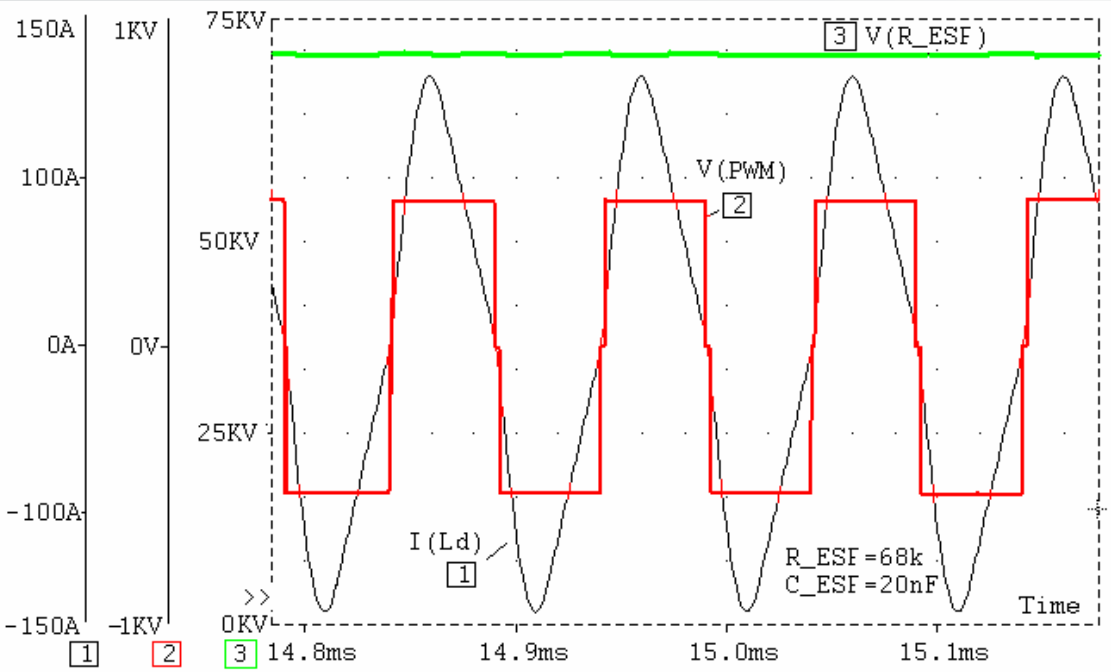


CH1-NAPON PRIMARA VN TRANSF. 0.5kV/c
CH2-STRUJA PRIMARA VN TRANSF. 20A/c

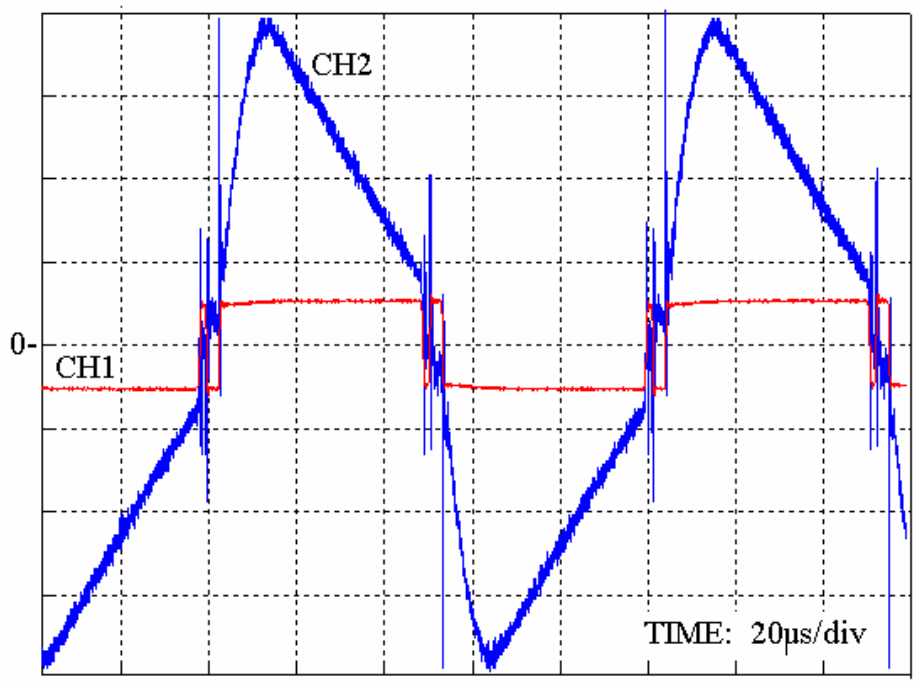
Stvarni ociloskopski snimci izlaznog napona (CH1) i struje (CH2) IGBT pretvarača; izlaz VNVF jedinice kratko spojen.; duty cycle” δ = 15%

institut MIHAJLO PUPIN

IZLAZNI NAPON I STRUJA IGBT PRETVARAČA VNVF JEDINICE i IZLAZNI NAPON VNVF JEDINICE Režim: NOMINALNO OPTEREĆENJE



Simulacioni rezultat za kolo multirezonatne topologije , pri nominalnom režimu opterećenja; *RESF=68kΩ; VESF=70kV, IESF=1A, δ=15%*



CH1-NAPON PRIMARA VN TRANSF. 1kV/c
CH2-STRUJA PRIMARA VN TRANSF. 50A/c

Osciloskopski snimci izlaznog napona (CH1) i struje (CH2) IGBT pretvarača; izlazni napon VNVF jedinice , UESF=70kV, izlazna struja IESF=1A.

institut MIHAJLO PUPIN

VNVF napajanje AR100/1000 ELEKTROSTATIČKIH IZDVAJAČA na TERMOELEKTRANAMA

-ULAZNI NAPON: 3x400V, 50Hz

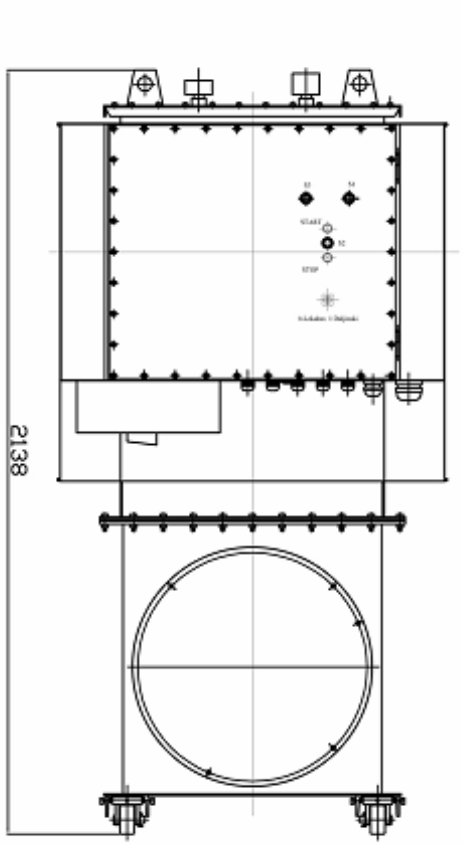
-**SNAGA**: 100kVA

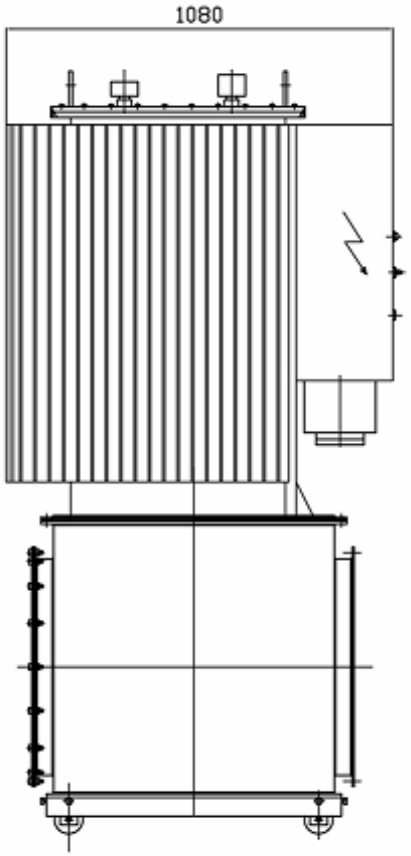
-IZLAZNI NAPON:100kVDC

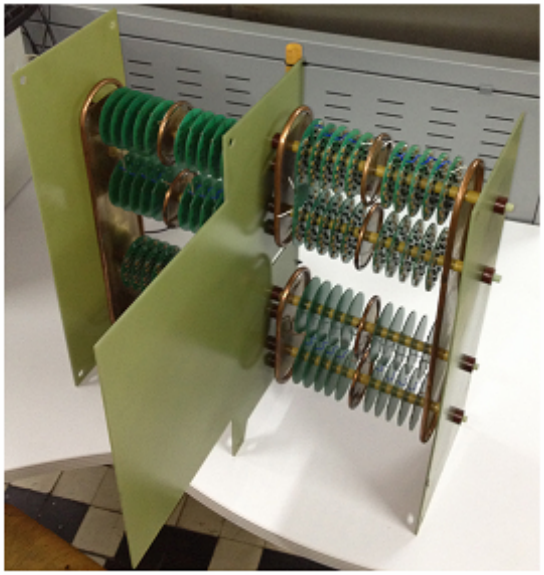
-IZLAZNA STRUJA: 1A

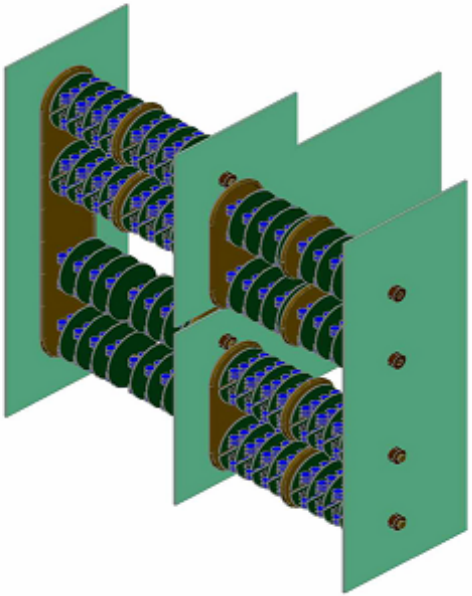
MULTIREZONANTNA TOPOLOGIJA

-DSP kontrola ☺









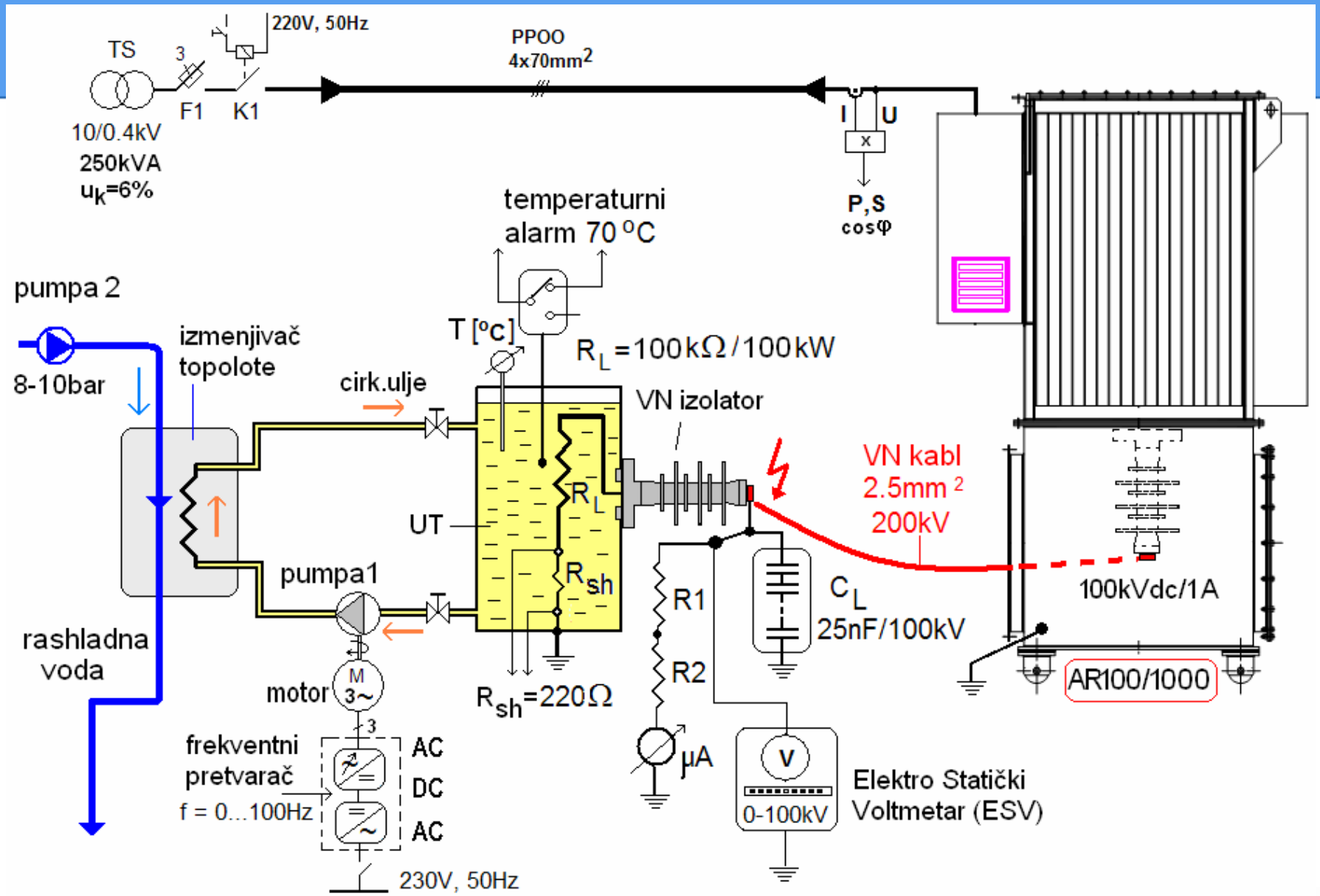
Geometrijske dimenzije VNVF napajanja AR70/1000 (gore) i izgled VNVF diodnog ispravljača (dole)

institut MIHAJLO PUPIN

TERMIČKA KARAKTERIZACIJA napajanja AR100/1000

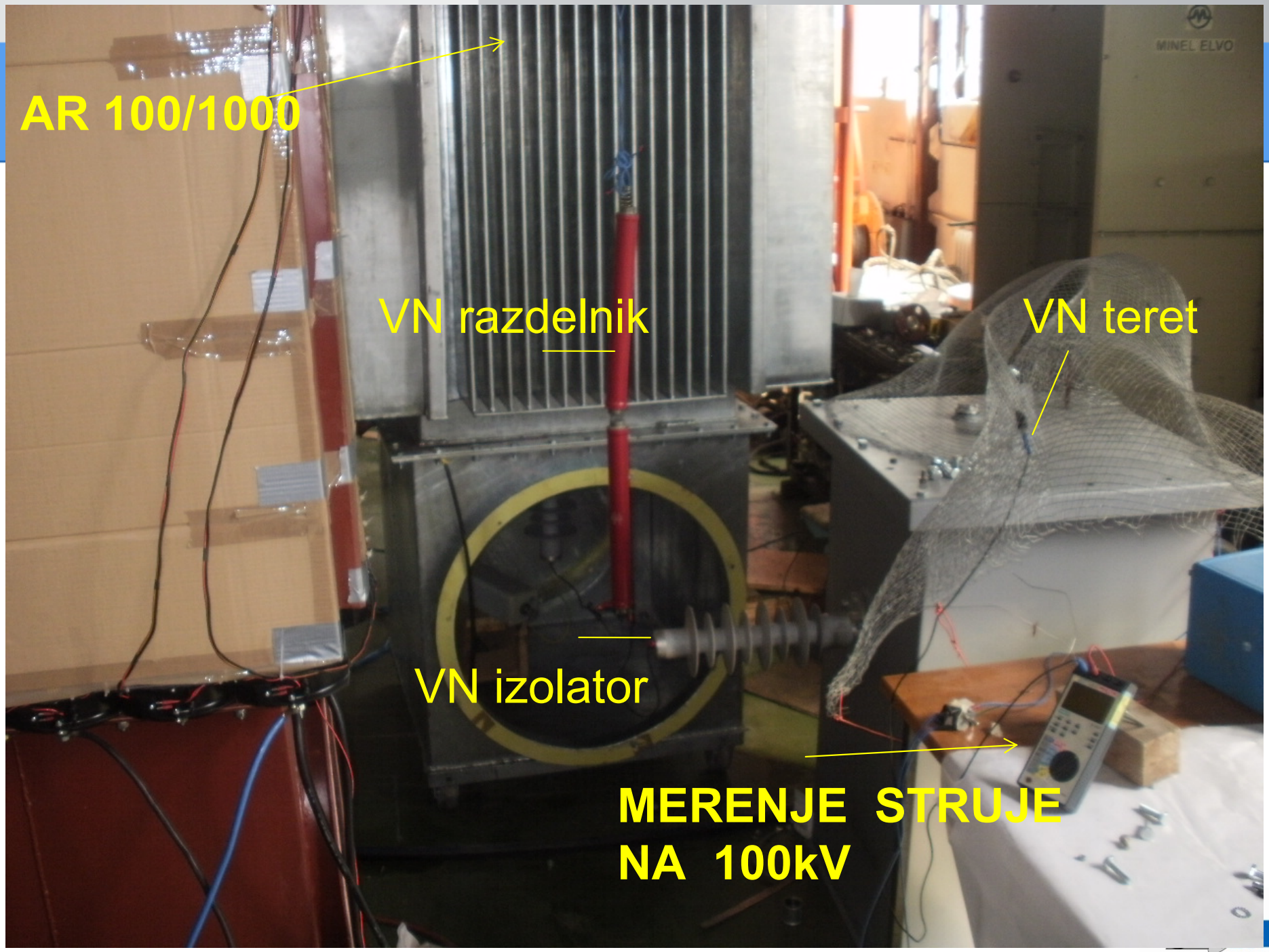
- U toku razvoja VNVF energetskog pretvarača pokazala se potreba za termičkim testovima obzirom da je nivo gubitaka celokupnog sistema koga čine VF pretvarač, VN ispravljački deo i VNVF transformator, 5% (5kW) u odnosu na maksimalnu izlaznu snagu 100kW.
- Eksperimentalni rezultati dobijeni na razvijenom prototipu (komercijalno nazvanom AR100/1000) u laboratorijskim uslovima, a pre isporuke serije VNVF jedinica u realne eksploatacione uslove na termo-bloku TENT-A1.

ELEKTRO-TERMIČKA INSTALACIJA ZA TERMIČKU KARAKTERIZACIJU VNVF NAPAJANJA AR100/1000

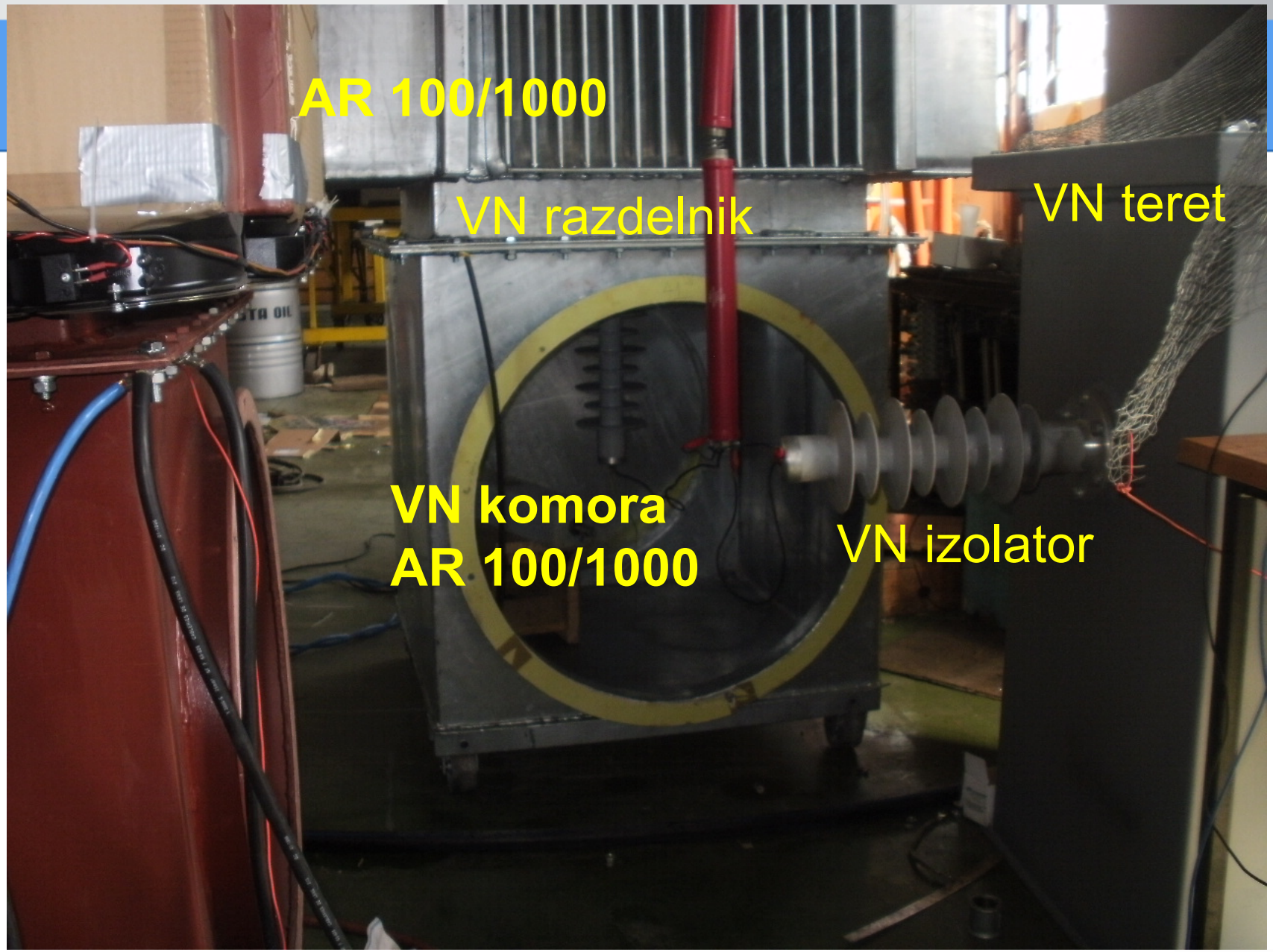


institut MIHAJLO PUPIN

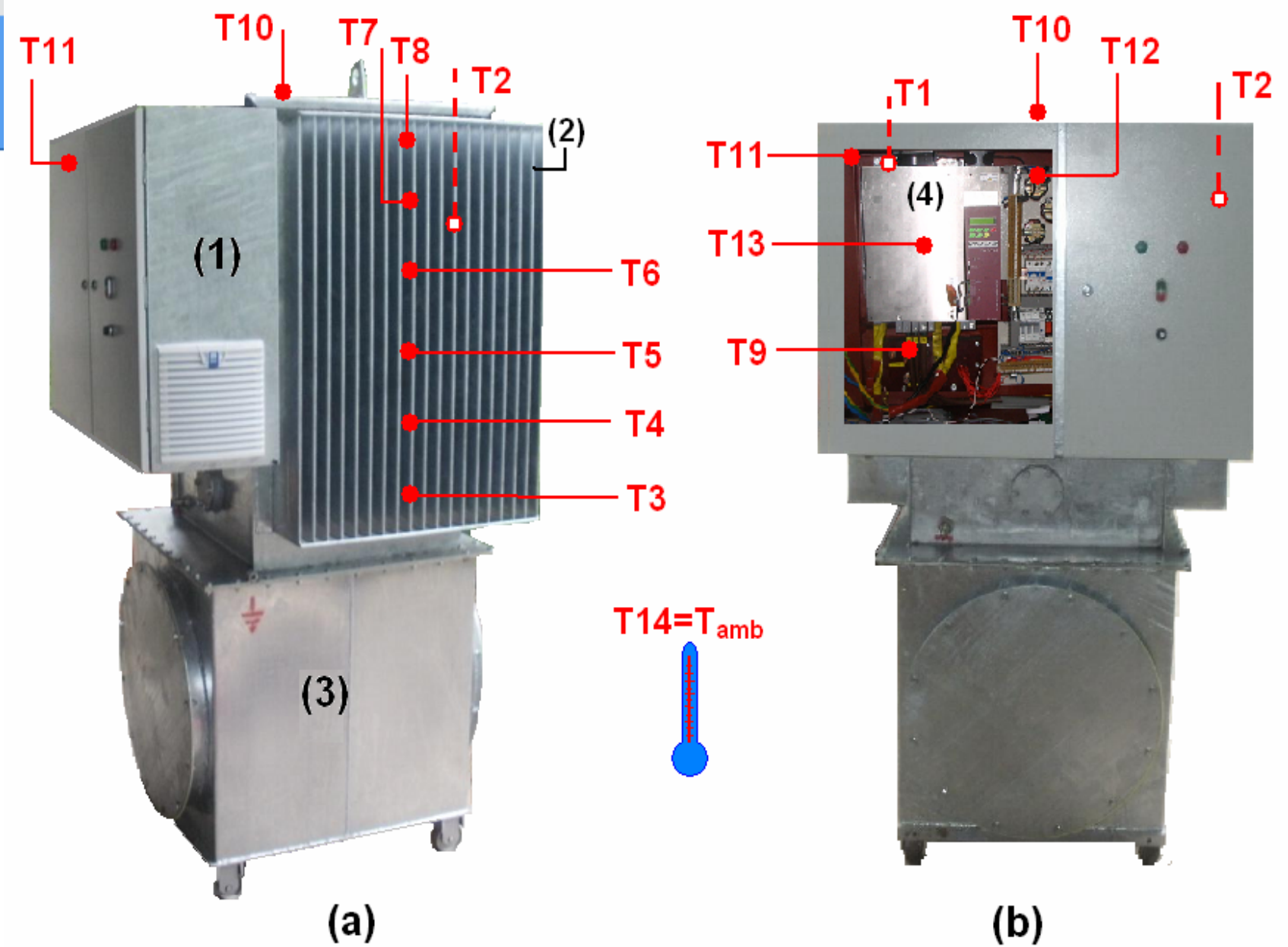
IZGLED TERMIČKE INSTALACIJE



IZGLED TERMIČKE INSTALACIJE



DISPOZICIJA KARAKTERISTIČNIH MERNIH TAČAKA

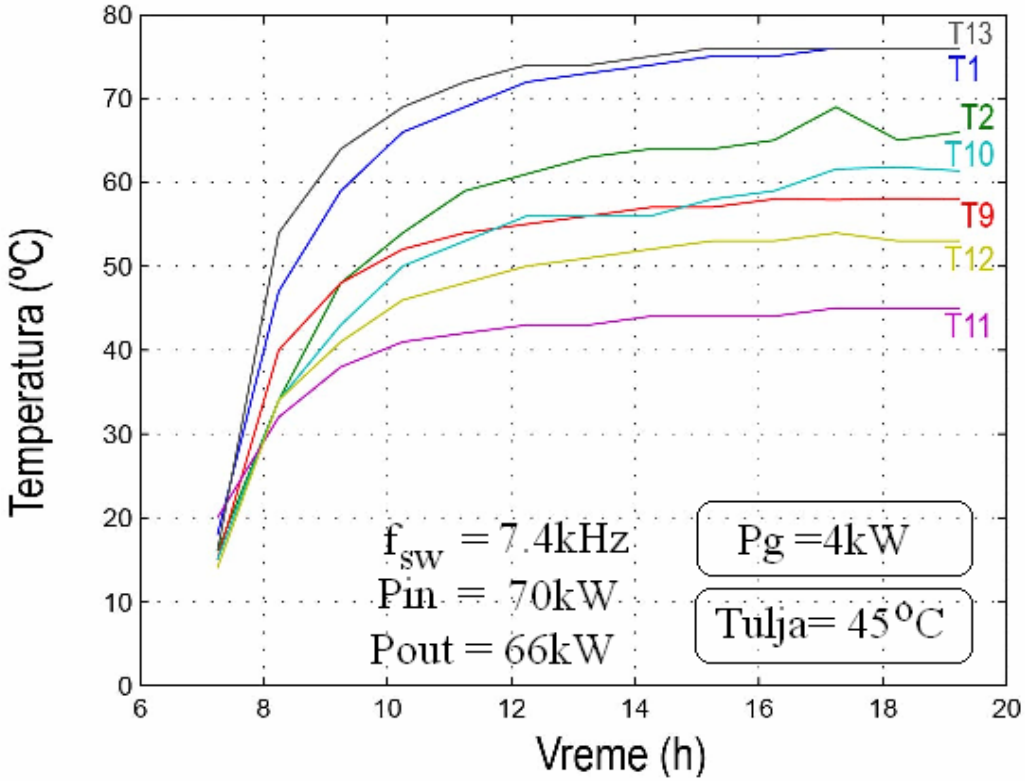


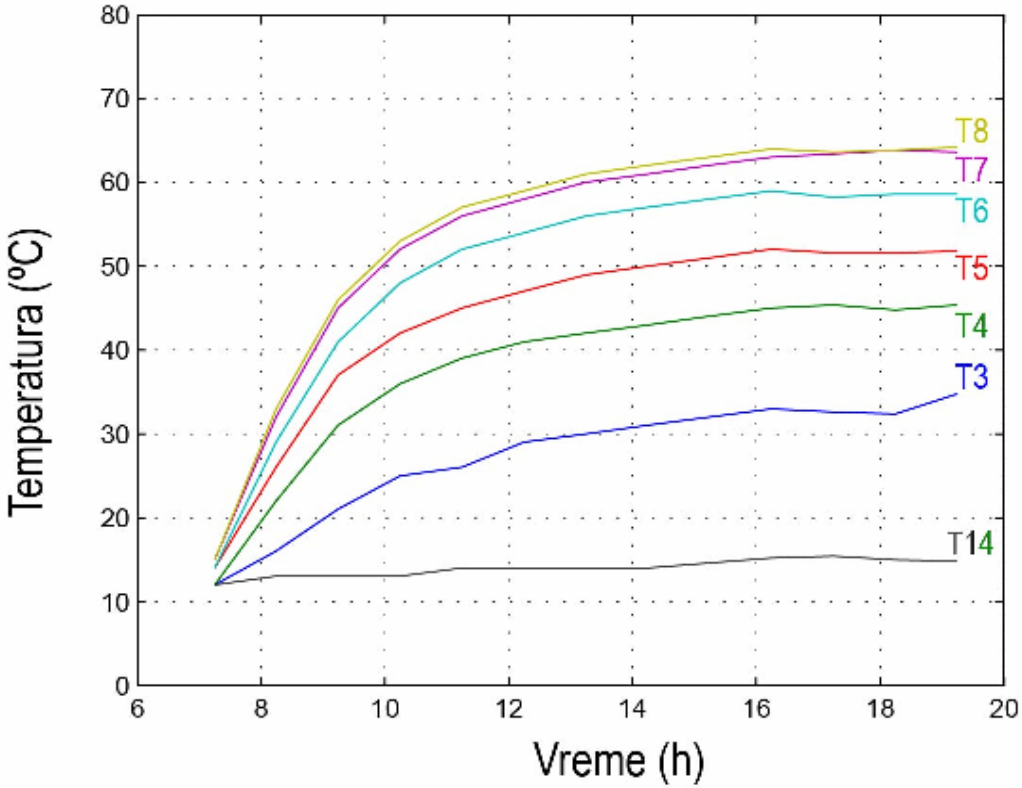
(a)bočni pogled, (b) pogled sa prednje strane

institut MIHAJLO PUPIN

EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Termički test ESI napajanja AR100/1000 pri 70% pune izlazne snage ; prekidačka učestanost multi-rezonantnog pretvarača 7.4kHz



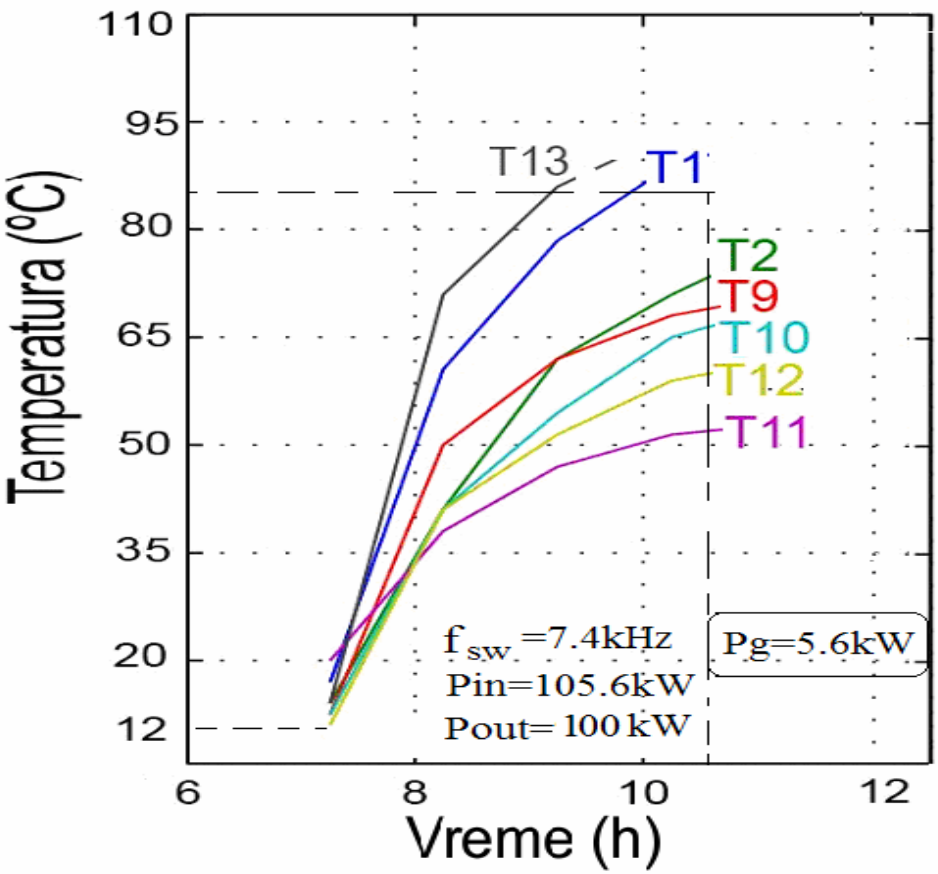


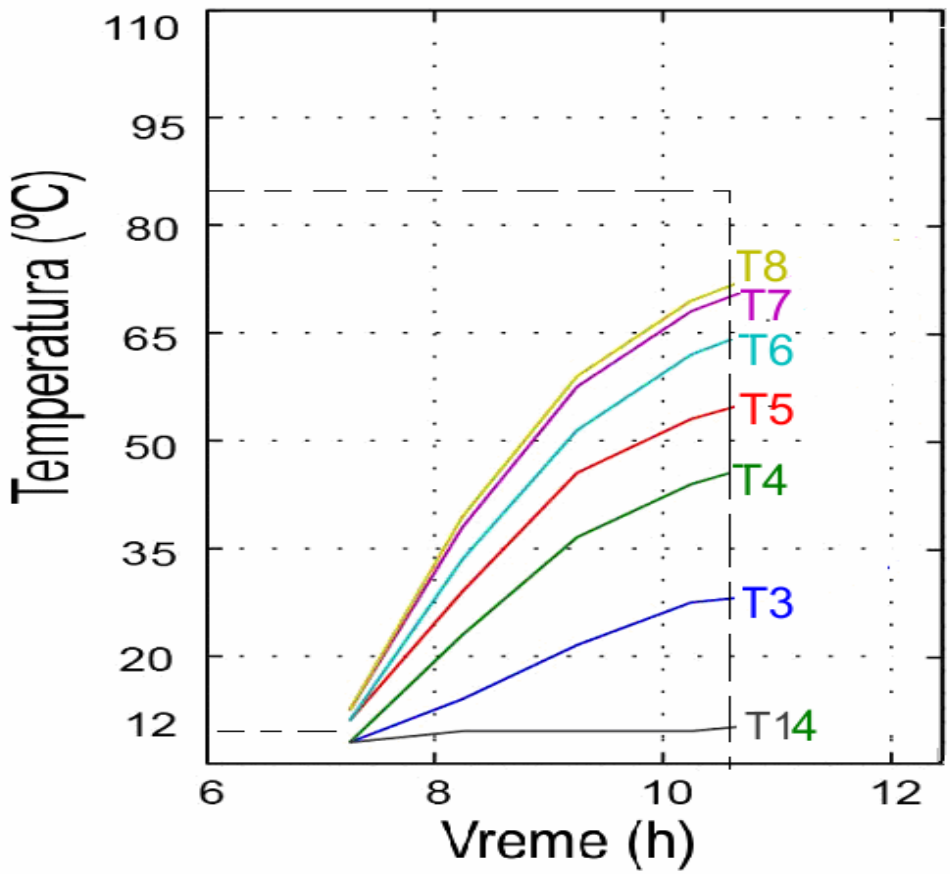
Najveći porast temperature (T1) se postiže na elektrolitskim kondenzatorima u DC međukolu multi-rezonantnog VF pretvarača. Taj porast je iznosio oko 65°C . Približno ista vrednost porasta temperature (T13) se dobila i na hladnjaku uređaja DS2000. Temperatura ulja T10 u gornjem delu T/I suda je iznosila oko 65°C (nad temperatura 53°C). Ovo je oblast najveće temperature ulja u transformatorskom sudu. Nad temperatura ulja u oblasti oko namotaja VNVF transformatora nije prelazila vrednost od 45°C (jedna od krajnje očitanih vrednosti)

institut MIHAJLO PUPIN

EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Termički test ESI napajanja AR100/1000 pri punoj snazi i bez bočnog strujanja vazduha ; prekidačka učestanost multi-rezonantnog pretvarača 7.4 kHz



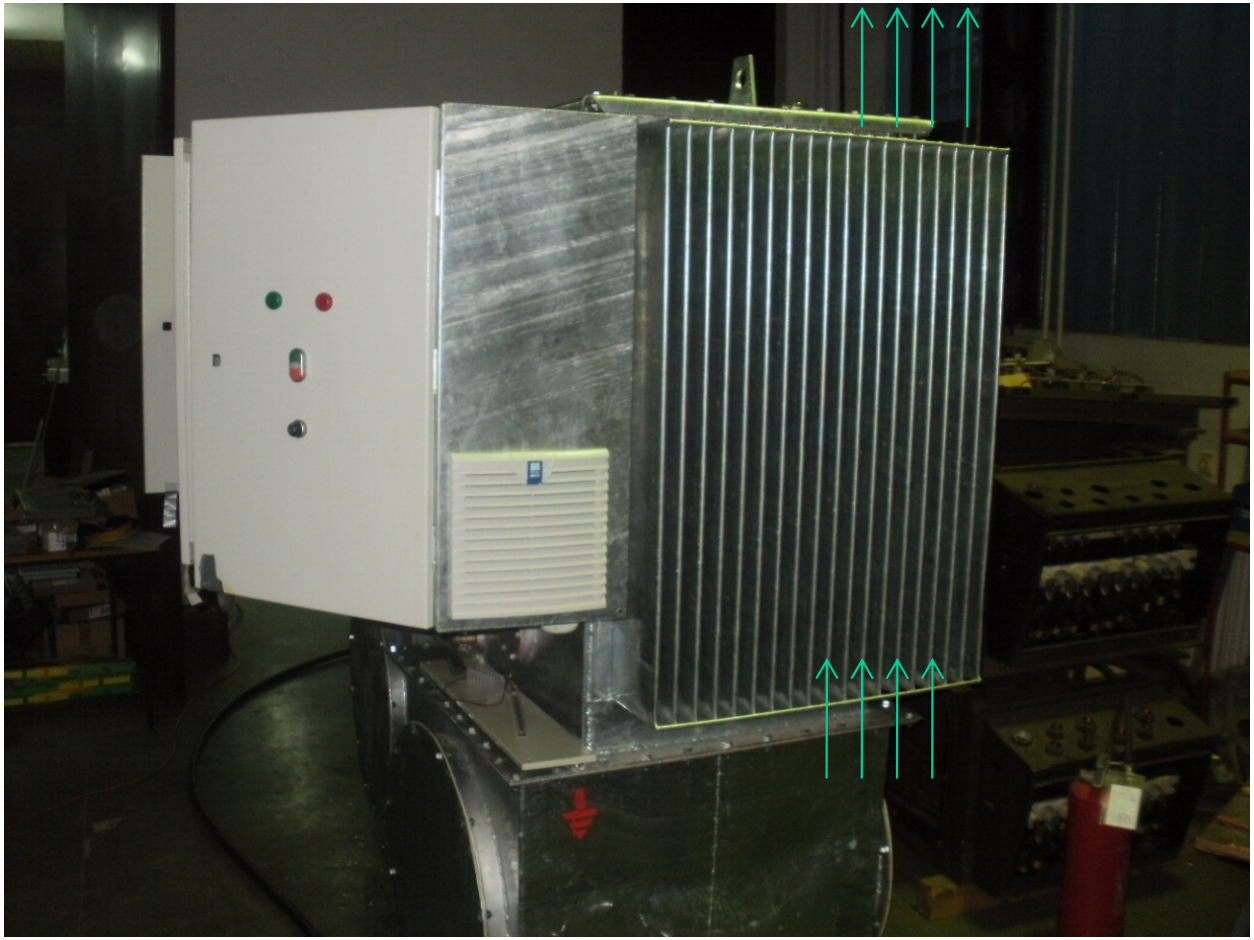


Ovi porasti temperature u odnosu na temperaturu okoline su iznosili preko 70°C, tako da je ceo eksperiment morao biti prekinut nakon tročasovnog zagrevanja kako ovi porasti ne bi prešli granične, odnosno maksimalno dozvoljene vrednosti (tzv. *absolute maximum ratings*).

institut MIHAJLO PUPIN

- **Iz ovih razloga, i u ovom slučaju kao u prethodnom, moralo je biti predviđeno adekvatno hlađenje jedinice AR100/1000!!!**

FORSIRANO HLAĐENJE TANKA SA ULJEM (trafo suda napajanja AR70/1000)

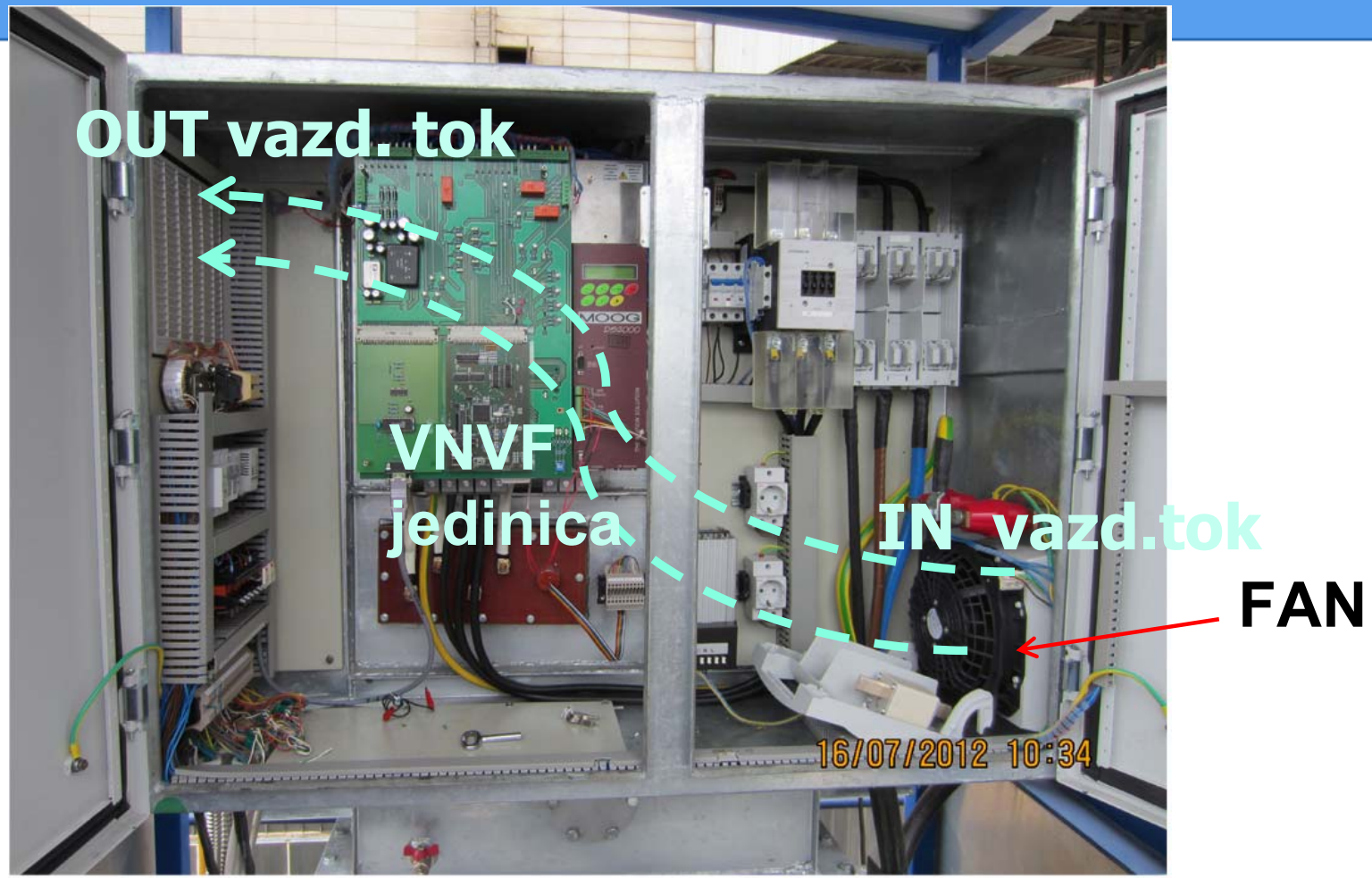


OUT vazd.toka

IN vazd.toka

institut MIHAJLO PUPIN

FORSIRANO HLAĐENJE ORMANA VF NAPAJANJA

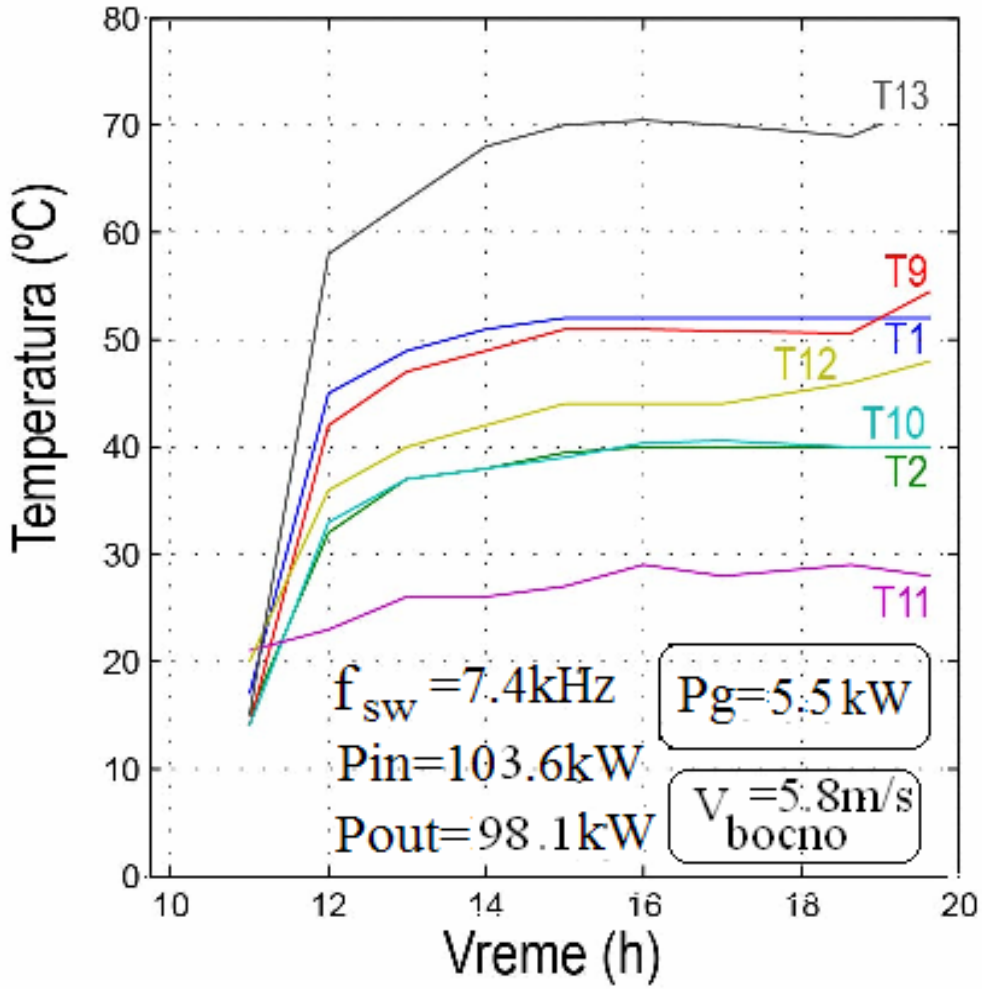


ORMAN AR70/1000

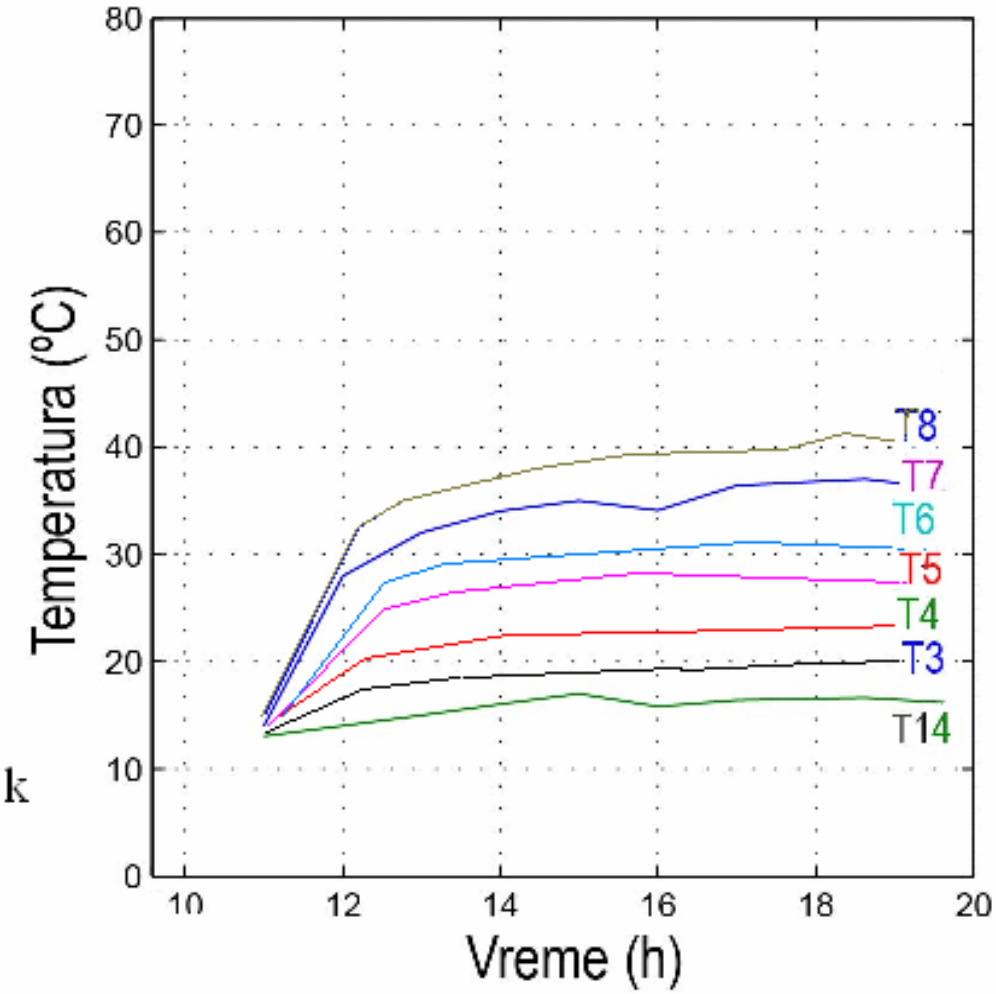
institut MIHAJLO PUPIN

EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Termički test ESI napajanja AR100/1000 pri punoj snazi i sa bočnim strujanjem vazduha brzine 5.8m/s ; prekidačka učestanost multi-rezonantnog pretvarača 7.4 kHz



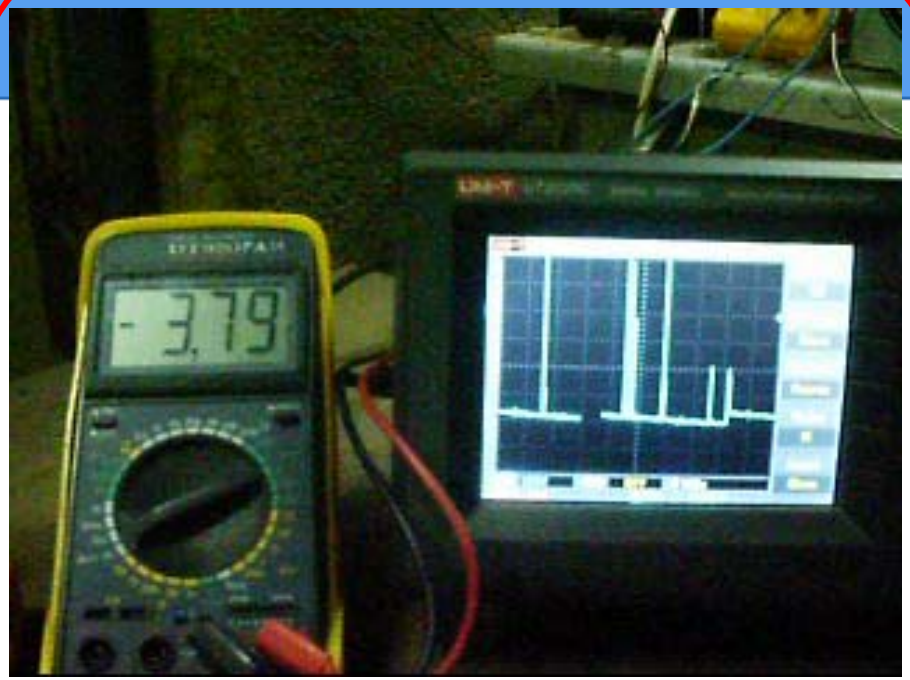
k



institut MIHAJLO PUPIN

VNVF napajanje AR100/1000 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

REZULTAT PROJEKTA TR33022



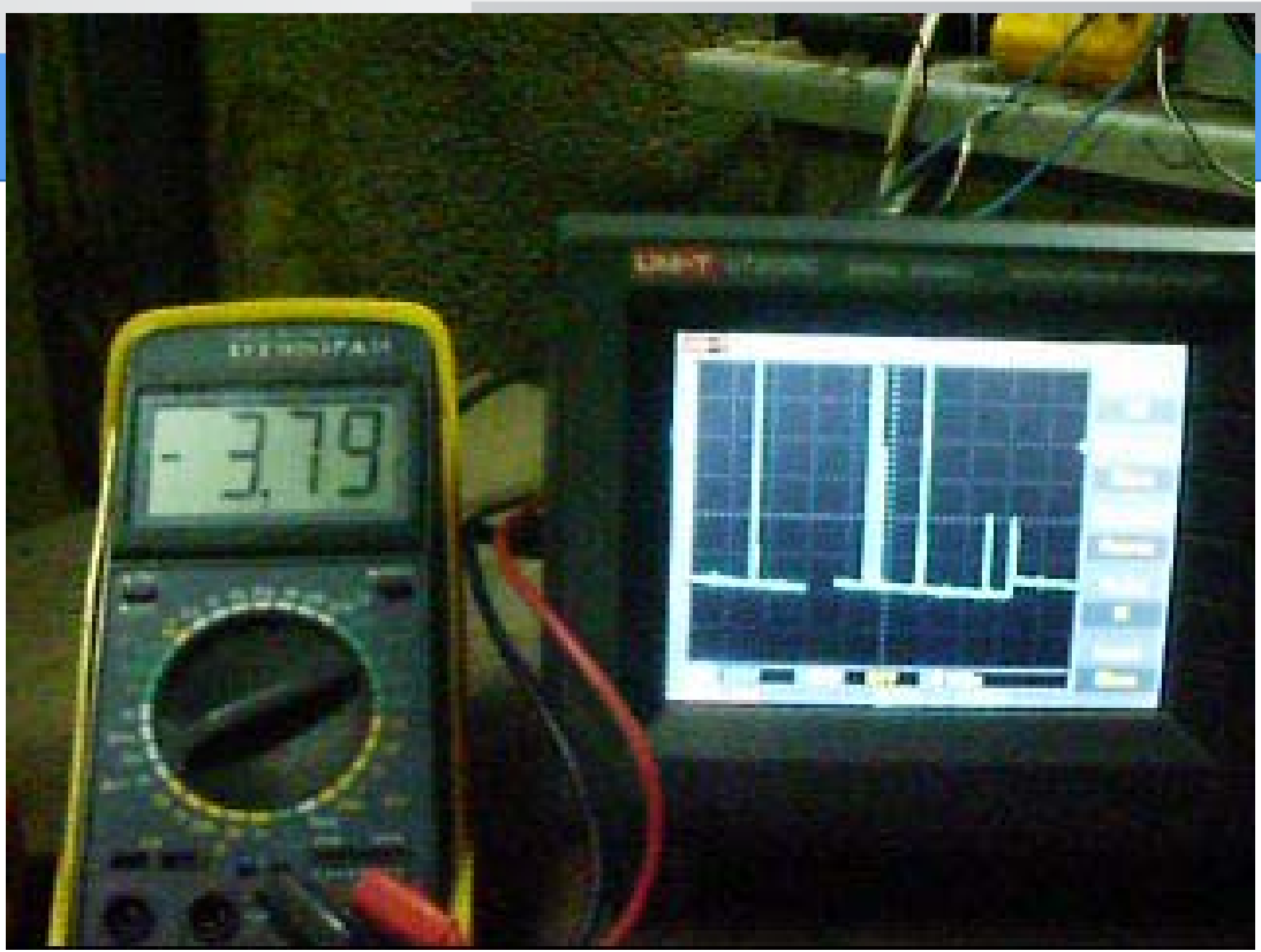
DETEKCIJA PROBOJA NA VN strani 100kV
1V→10kV/c

NAPON I STRUJA PRIMARA VN TRANSFORMATORA TOKOM DETEKCIJE PROBOJA NA VN STRANI

GORNJI TRAG: NAPON (500V/c)
DONJI TRAG: STRUJA (60A/c)

REZULTAT PROJEKTA TR33022

institut MIHAJLO PUPIN

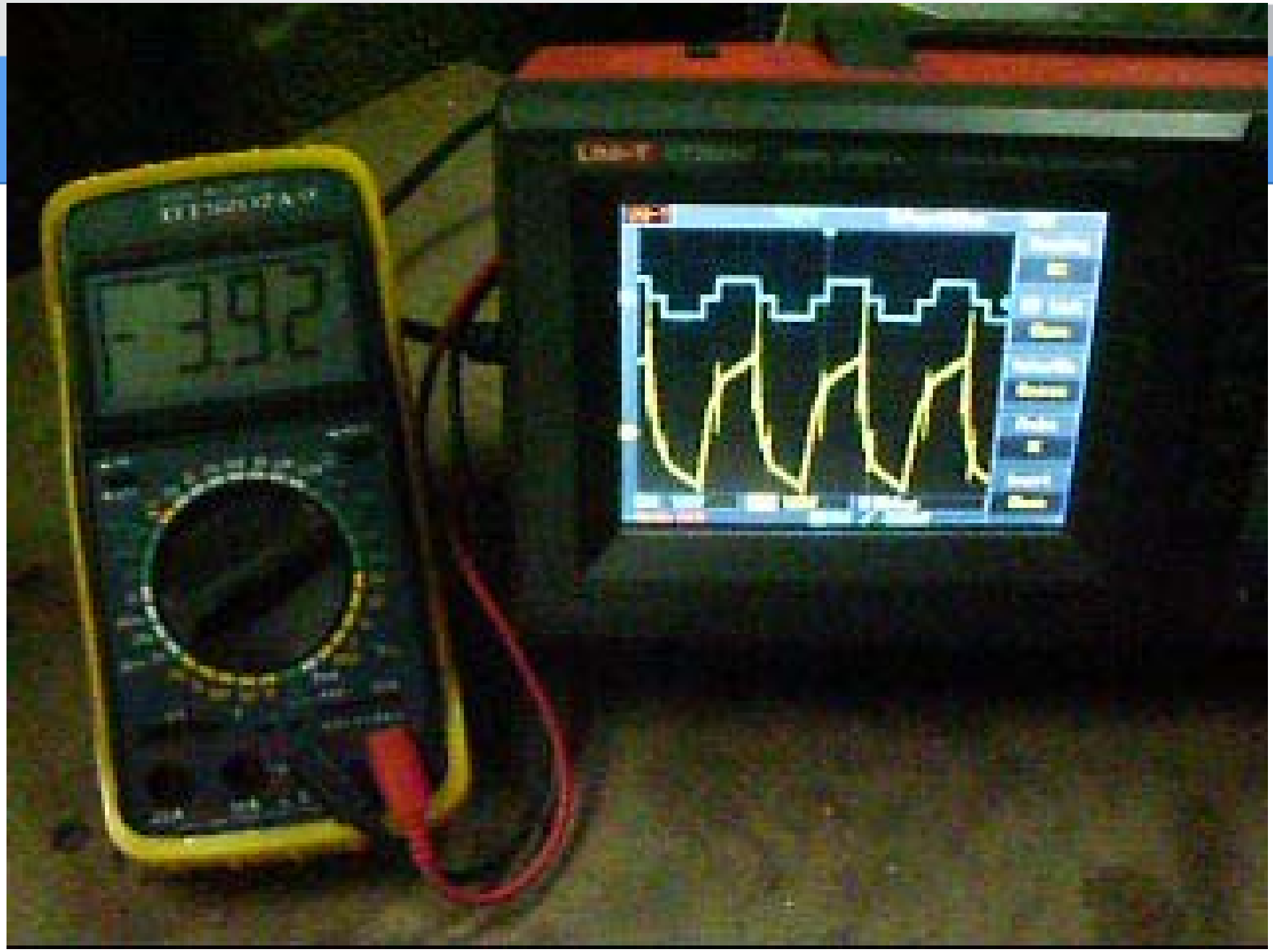


Preskoci na ESI –Osciloskopski snimak (5V→100kV)

institut MIHAJLO PUPIN

Struja i napon na izlazu IGBT pretvarača –TE Morava

institut MIHAJLO PUPIN



AR100/1000-snimci struje i napona IGBT pretvarača

institut MIHAJLO PUPIN

Preskoci 2 na ESI –Osciloskopski snimak (5V→100kV)

institut MIHAJLO PUPIN

Retrofit napajanje ESI-osciloskopski snimci

institut MIHAJLO PUPIN

DALJI PRAVCI ISTRAŽIVANJA- koji bi mogli biti interesantni za istraživače u IMP

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

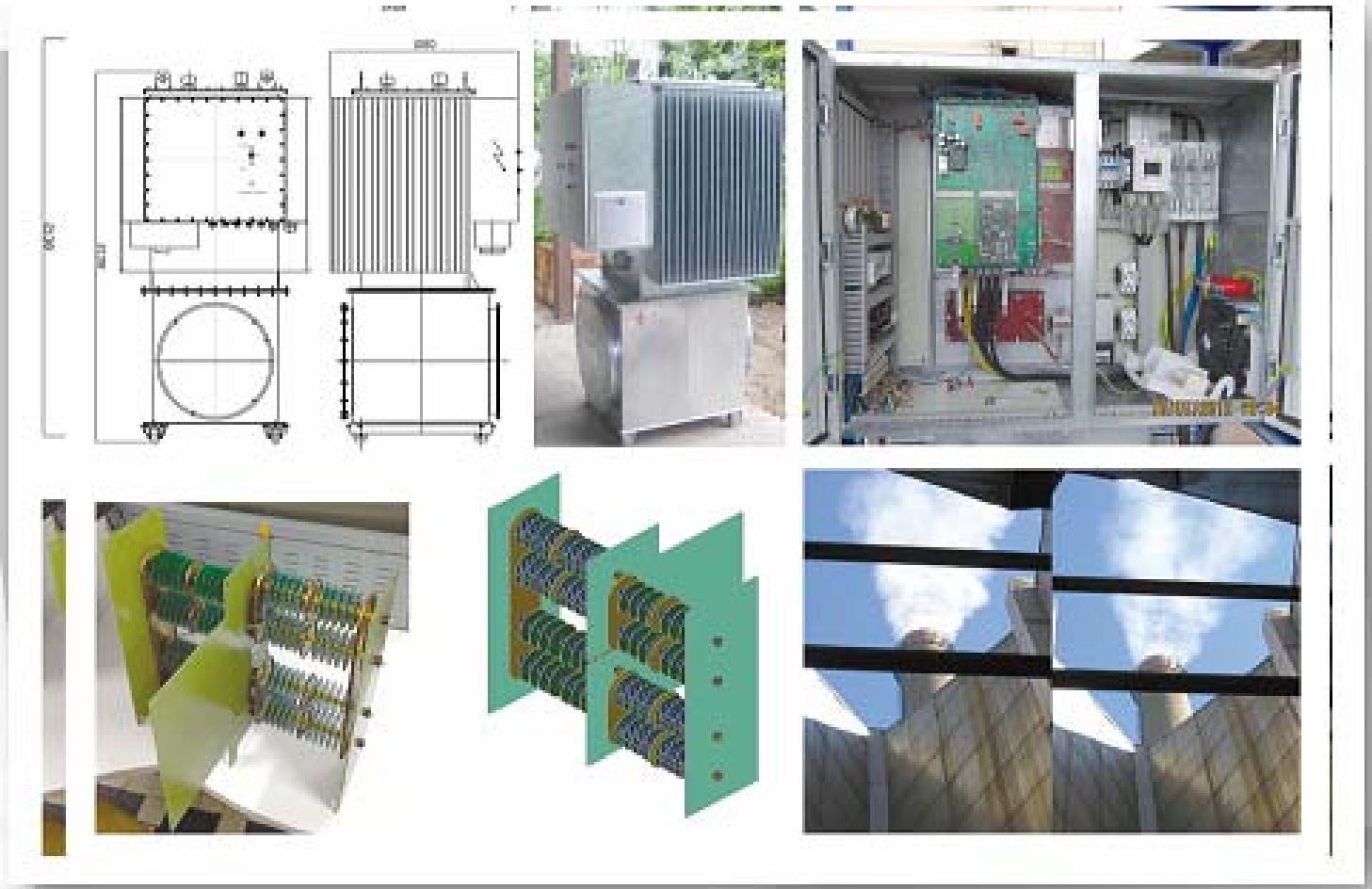
4.Povećanje efikasnosti izdvajanja, sprečavanje povratne korone, detekcija debljine sloja nataloženog pepela (merenje struja LEM strujnim senzorima, po elektrodama sekcije ili po grupama elektroda

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.

Hvala na pažnji !!!



Beograd, IMP, 07. mart 2017.

institut MIHAJLO PUPIN