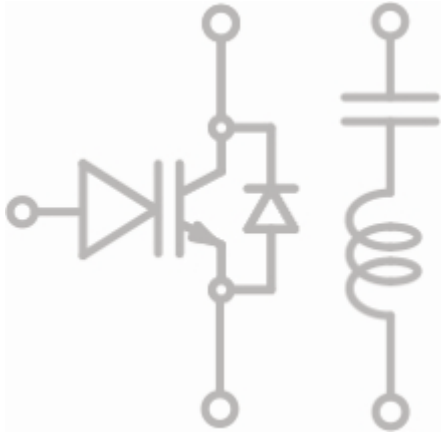




СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ
Галерија науке и технике



СРПСКИ НАУЧНИЦИ У ЕНЕРГЕТСКОЈ ЕЛЕКТРОНИЦИ





СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ
Галерија науке и технике

**„СРПСКИ НАУЧНИЦИ У ЕНЕРГЕТСКОЈ
ЕЛЕКТРОНИЦИ“
ГАЛЕРИЈА НАУКЕ И ТЕХНИКЕ САНУ број 43**

Изложбу приређују

Академијски одбор за енергетику САНУ
Одељење техничких наука САНУ
Галерија науке и технике САНУ

Аутор изложбе

Слободан Н. Вукосавић

Сарадници на организацији изложбе

Бојана Божић Хреља, кустос
Јасмина Ковачевић, кустос

Графички дизајн изложбе

Дамир Влајнић

Техничка реализација изложбе

Владан Савић

Дизајн анимација

Ива Ћирић

Публикацију издаје

Српска академија наука и уметности

За издавача

Зоран Љ. Петровић, управник Галерије науке и технике САНУ

Аутор каталога

Слободан Н. Вукосавић

Сарадници

Петар Грбовић
Игор Цветковић
Драган Максимовић
Ласло Хубер
Војислав Стефановић
Дражен Дујић
Владимир Катић
Никола Челановић
Емил Леви
Влатко Влатковић
Предраг Пејовић

Рецензенти

Зоран Љ. Петровић
Нинослав Стојадиновић

Графички дизајн каталога

Дамир Влајнић

Лектура

Весна Шубић

Штампа

Colorgrafx

Тираж 500

Београд 2020.

Покровитељи изложбе

ИМП-Аутоматика, Институт Михајло Пупин Београд
Електротехнички институт Никола Тесла, Београд

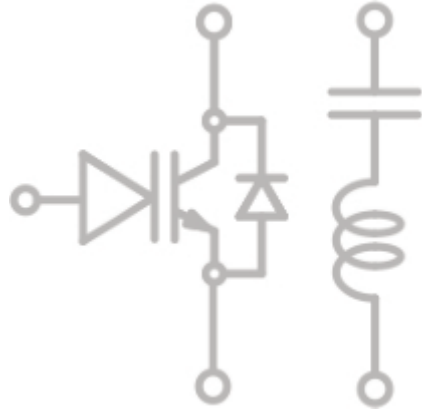


СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ
Галерија науке и технике

СРПСКИ НАУЧНИЦИ
У ЕНЕРГЕТСКОЈ ЕЛЕКТРОНИЦИ

САДРЖАЈ

Увод	6
Допринос академика Илије Обрадовића	14
Допринос академика Петра Миљанића	16
Допринос професора Владана Вучковића	20
Допринос професора Славољуба Марјановића	22
Допринос професора Војислава Стефановића	24
Допринос професора Дејана Шрајбера	28
Допринос професора Слободана Ђука	30
Допринос професора Душана Боројевића	32
Допринос професора Милана М. Јовановића	36
Допринос др Ласла Хубера.....	38
Допринос професора Владимира Катића.....	40
Допринос професора Емила Левија.....	42
Допринос професора Драгана Максимовића.....	46
Допринос професора Слободана Н. Вукосавића.....	50
Допринос др Влатка Влатковића.....	54
Допринос професора Предрага Пејовића.....	56
Допринос браће др Николе Челановића и др Ивана Челановића.....	58
Допринос професора Петра Ј. Грбовића.....	62
Допринос др Игорa Цветковића.....	64
Допринос професора Дражена Дујића.....	66



Увод

Српски научници у енергетској електроници

Енергија је ослонац непрекидног метаболизма у свим живим бићима али и кључни фактор који одређује развој, успех и проблеме људског друштва. Она омогућује индустријску производњу, транспорт, рад рачунара и система за комуникацију и представља знатан део вредности свих производа и роба. Сви кораци у развоју људског друштва условљени су променама у начину на који се обезбеђује неопходна енергија. Према предвиђањима, потрошња електричне енергије ће средином 21. века бити четири пута већа од потрошње енергије у другим облицима. Процеси претварања у свим изворима и процеси прилагођавања напона и струја потребама потрошача обављаће се уз помоћ уређаја енергетске електронике.

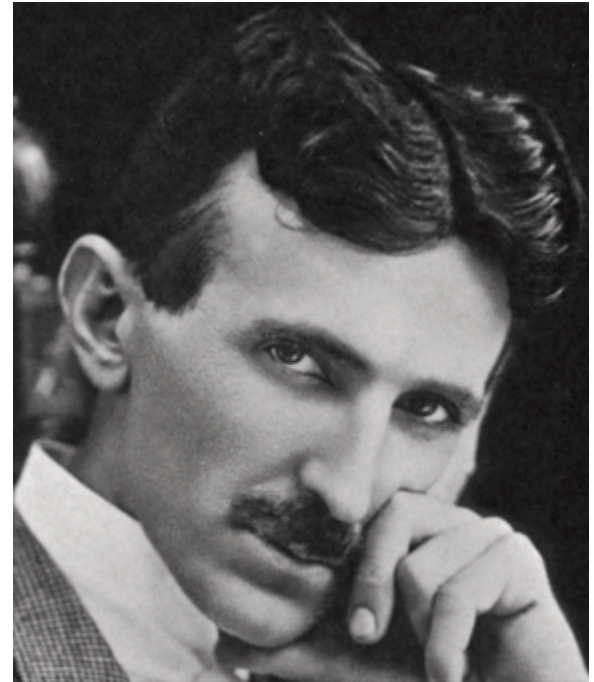
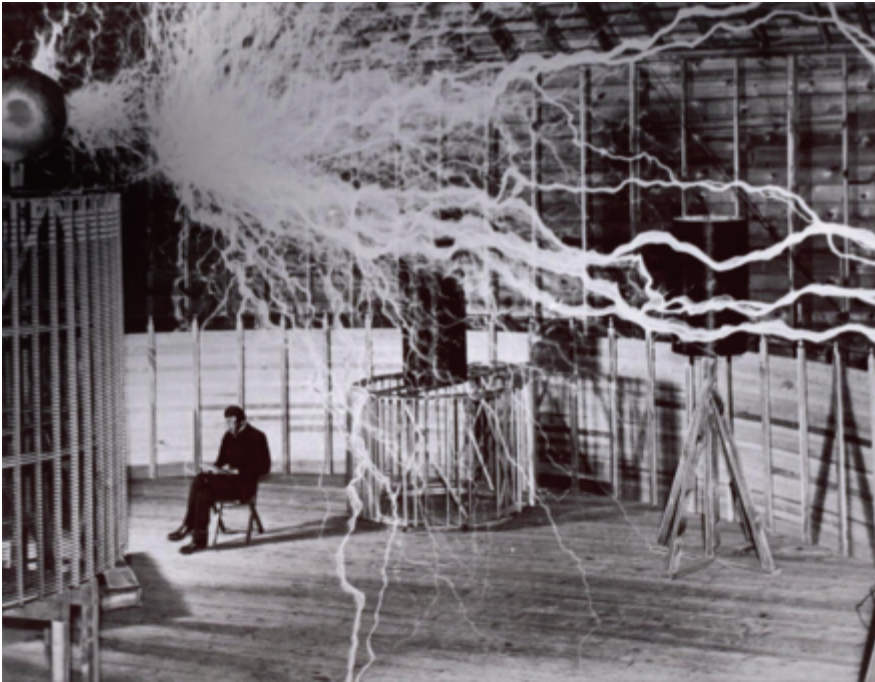
Доступност електричне енергије и потрошња по глави становника одређују степен развоја заједнице, животни век појединца и његову могућност да у пуној мери искористи свој потенцијал и да пружи свој допринос заједници. Више од милијарде људи живи без снабдевања електричном енергијом док је за две милијарде снабдевање несигурно. Остатак света користи електричну енергију добијену на начин који угрожава окружење и подстиче глобално загревање. Енергију која се добија из фосилних горива треба заменити енергијом из обновљивих извора који раде без емитовања штетних материја. Предуслов за коришћење обновљивих извора и за напајање потрошача у неразвијеним земљама је развој енергетске електронике, области којој су значајно допринели и којој и данас доприносе српски научници.

Енергетска електроника користи полупроводничке направе за претварање и усмеравање електричне енергије. У електричним мрежама, уређаји енергетске електронике преузимају улогу трансформатора и генератора. Савремени извори и потрошачи повезани су на мрежу преко уређаја енергетске електронике који омогућују ефикасније коришћење енергије и сигурније снабдевање.

Средином двадесетог века, развој полупроводничких прекидача какви су тиристори и прекидачки транзистори убрзава развој енергетске електронике и омогућује пројектовање првих енергетских претварача за индустријске примене. На почетку 21. века, енергетска електроника је ослонац рада кућних апарата, информационо-комуникационих уређаја, обновљивих извора, производних процеса, друмских и шинских возила, војне и медицинске опреме и свих технолошких достигнућа која омогућују или олакшавају живот и рад савременог човека. Енергетска електроника је кључни ослонац четврте индустријске револуције која се не може замислити без електронског управљања процесима размене, трансформације и складиштења енергије. Садржај изложбе указује на доприносе које су у пољу енергетске електронике дали српски научници.

Од Николе Тесле до електронске енергетике

Крајем 19. века, изуми Николе Тесле омогућили су развој електричних мрежа са наизменичним струјама и ефикасно снабдевање удаљених потрошача електричном енергијом. Доступност електричне енергије омогућила је напредак науке, нова технолошка решења и убрзан развој индустрије. Теслу и данас помињемо као „човека који је изумео 20. век“.



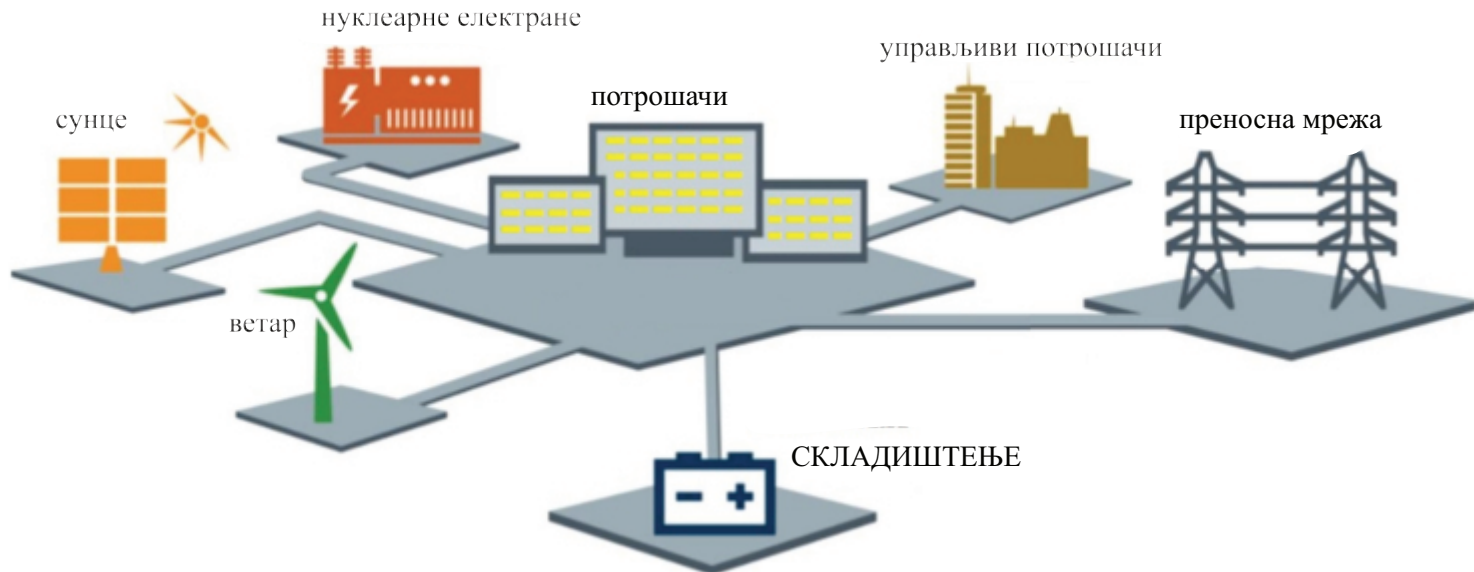
Захваљујући преносу електричне енергије путем мрежа са наизменичним струјама, парне машине су замењене електричним моторима, створени су услови за аутоматизацију производних линија, рад у канцеларијама и домаћинствима је олакшан применом електричних уређаја, док су гасне светиљке замењене електричним сијалицама. На значај наведених промена указују и фотографије Земље начињене из свемира. Чаробно ноћно светлуцање обала и градова стварају небројене електричне светиљке напајане из електричних мрежа са наизменичним струјама.



Сигурност и доступност електричне енергије је и данас темељ опстанка и развоја људског друштва. Енергетски систем 20. века се у великој мери ослањао на фосилна горива чије се залихе убрзано смањују. Коришћење преосталих резерви фосилних горива доводи до значајног загађења животне средине. Ради замене фосилних горива, у енергетски систем се укључују „обновљиви“ извори енергије, извори који нису ограничени залихама. Предност се даје изворима који током градње и коришћења мање загађују животну средину.



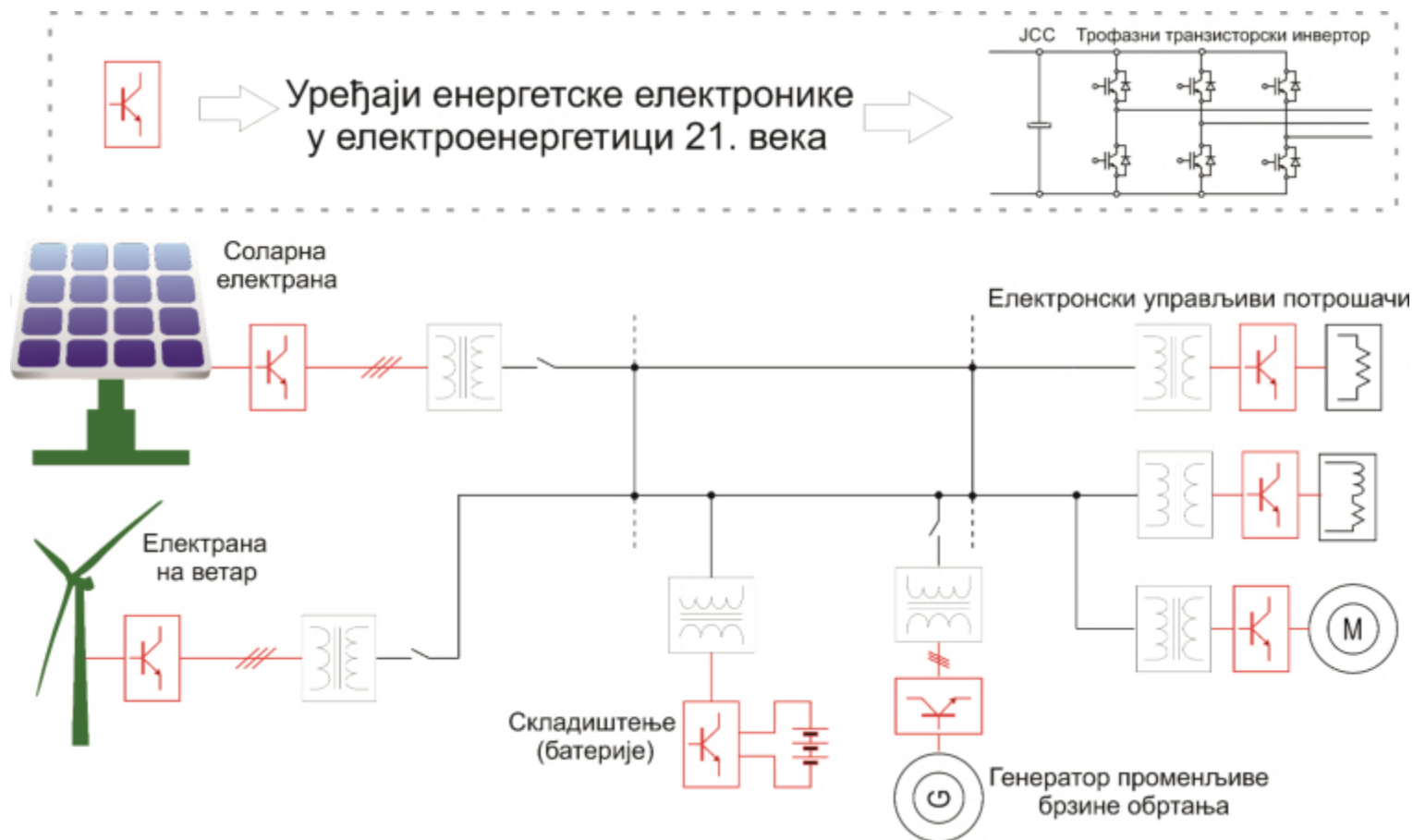
Снага електрана на ветар сунце зависи од доба дана и од локалних услова. Она се не може ускладити са потрошњом, што доводи до губитка равнотеже у мрежи и ствара озбиљне техничке проблеме. Током сунчаног и ветровитог дана постоји потреба да се енергија складишти да би се обезбедило напајање потрошача у интервалима без сунца и ветра. Поред складиштења у реверзибилним хидроелектранама, вишак енергија се може користити за пуњење стационарних батерија. У интервалима повећане потрошње, неопходна енергија се добија пражњењем батерија.



Електроенергетска мрежа се непрекидно мења и постаје децентрализована, увећава се удео обновљивих извора и број електронски контролисаних потрошача. Према предвиђањима, потрошња електричне енергије ће до 2050. године бити удвостручена и представљаће више од 80% укупне потрошње, док ће групе потрошача имати могућност локалне производње и складиштења ($production+consumer = prosumer$).



Извори и потрошачи у савременој електричној мрежи повезују се на мрежу преко уређаја енергетске електронике, направа које обликују и прилагођавају напоне и струје на начин који омогућује управљив и ефикасан начин размене енергије између електрана, потрошача и система за складиштење. Претварање енергије унутар уређаја енергетске електронике темељи се на примени електронских прекидача снаге, међу којима су диоде, тиристори и транзистори, као и спрегнути калемови и кондензатори.



Развој електроенергетике указује да ће значај уређаја енергетске електронике у мрежама 21. века бити упоредив са значајем Теслиних изума и наизменичних струја у електричним мрежама с краја 19. века. Електроенергетика се убрзано мења и све више постаје *електронска енергетика*. Недовољно је познато да су веома значајан допринос развоју енергетске електронике дали српски научници. Током претходних педесетак година, многа кључна решења настала су у лабораторијама наших истраживача који су у великој мери одредили правце развоја енергетске електронике. Значај њихових достигнућа у области енергетске електронике упоредив је са доприносом који су српски стручњаци дали електротехници пре једног века.

Изложба „Српски научници у енергетској електроници“ настоји да прикаже правце развоја енергетске електронике и да укаже на улогу коју су имали и коју и даље имају српски научници и стручњаци.

Улога српских научника у настанку електронске енергетике

Током друге половине 20. века, истраживањем у области енергетске електронике бавили су се многи талентовани млади људи у лабораторијама српских факултета и института. Њихов удео у светској популацији енергетских електроничара вишеструко премашује очекивања. На велико интересовање за технику утицао је рад Николе Тесле и његова препознатљивост широм света. У време доминације једне политичке партије није охрабривано проучавање друштвених и политичких процеса на начин који би могао довести у питање јавне власти, што може бити разлог увећаног интереса за студије технике. На интерес за енергетску електронику додатно је утицала околност да су се питања лабораторијског простора и опреме дала решити много лакше него у другим гранама технике. И поред наведених разлога, треба нагласити да је на број и успешност српских научника у области енергетске електронике пресудан утицај имао њихов таленат и посвећеност. Многи наши стручњаци за енергетску електронику стекли су име и углед у познатим светским компанијама и на водећим универзитетима. Они већином живе и раде изван Србије дајући значајан допринос развоју електронске енергетике у свету.

Потенцијал српских истраживача и стручњака доприноси повезивању енергетике и информационо-комуникационих технологија. Применом нових технологија могу се решити многи проблеми савремене енергетике, док је електрична енергија предуслов за рад свих технолошких направа. Почевши од управљачких система свемирских летилица па до савремених преносних рачунара, сервера и комуникационе опреме, многи рачунарски системи се напајају из уређаја енергетске електронике које су изумели српски научници. Рачунари, мреже и друге направе ИТ сектора су значајни потрошачи електричне енергије. Процењује се да ће за петнаестак година трошити сваки пети киловат-час. Комуникација и обрада података има своју енергетску цену. Током настанка, преноса и пријема једне поруке електронске поште троши се електрична енергију која одговара полчасовном раду сијалице од 60W. У исто време, уређаји енергетске електронике имају све већу примену у електроенергетици где омогућују да се остваре значајне уштеде и увећа енергетска ефикасност. Нова решења у пољу енергетске електронике стварају могућност да се реши проблем интеграције обновљивих извора у електроенергетски систем, један од кључних проблема енергетске транзиције.

Интеграција обновљивих извора

Енергетска електроника има кључну улогу у повезивању обновљивих извора на мрежу, док развој нових решења и нових уређаја енергетске електронике даје могућност интеграције обновљивих извора у систем и увећања њиховог удела у укупној производњи. Веома значајну улогу у примени достигнућа енергетске електронике и интеграцији обновљивих извора имају српски научници.

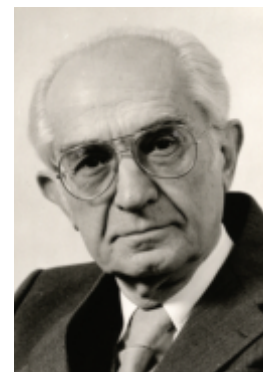
Традиционалне електране су управљиве, њихова снага се може мењати и прилагођавати снази потрошње. Традиционални потрошачи преузимају енергију у складу са својим тренутним потребама, док се снага традиционалних електрана прилагођава и доводи у равнотежу са потрошњом. Постоји иницијатива да се традиционалне електране на угаљ замене обновљивим изворима који користе енергију ветра и сунца. Радам таквих извора се не може управљати по жељи, јер њихова снага зависи од временских услова. Доступност енергије из обновљивих извора се најчешће не подудара са интервалима потрошње, те се јавља вишак или мањак енергије који ствара озбиљне техничке проблеме и угрожава рад система. Као привремено решење, вишак енергије може се складиштити у реверзибилним електранама да би се доцније користио у интервалима где се јавља мањак енергије у систему. Међутим, градња реверзибилних електрана и њихов рад имају негативан утицај на животну средину, док оперативни трошкови значајно оптерећују јединичну цену складиштене енергије.

Уз примену уређаја енергетске електронике, мање групе потрошача могу се опремити сопственим изворима и направама за складиштење, чиме се мрежа претвара у скуп повезаних активних група које могу да обаве читав низ програмабилних енергетских трансакција. Свака од њих може да напаја потрошаче у оквиру групе енергијом из локалних извора, енергијом из локалног складишта или енергијом преузетом из мреже. Могуће је уступати складиштену енергију мрежи и обављати друге енергетске трансакције од користи за саме потрошаче али и за целу мрежу. Повезивањем активних група у мреже ствара се могућност да се путем уређаја енергетске електронике планирају, уговарају и остварују енергетске трансакције између појединих група или трансакција са мрежним оператером. Свака од активних група повезаних мрежом може одабрати енергетске трансакције које дају најбоље финансијске или техничке ефекте. Описани развој и шира примена енергетске електронике омогућује аутоматизовано трговање енергијом мрежама. Када потрошња у мрежи одступи од производње, уређаји енергетске електронике могу да се користе за управљање складиштењем и снагом потрошње на начин који доприноси успостављању равнотеже.

Развој нових решења енергетске електронике у електроенергетици је још увек у зачетку, тако да постоји простор за ангажовање потенцијала којима располажу српски енергетичари. У оцени тих потенцијала треба имати у виду да је удео српских имена у листи светски познатих стручњака за енергетску електронику неупоредиво већи од броја који би се очекивао од земље величине Србије. Поред истраживача који раде у Србији, постоји и велики број српских научника који дају значајан допринос енергетској електроници радећи у водећим светским истраживачким центрима. Каталог садржи податке о њиховим главним доприносима.

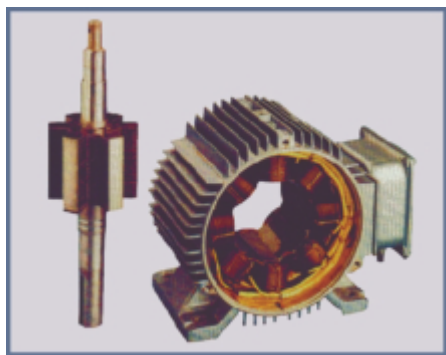
Развој прекидачких релуктантних мотора *SRM, Switched reluctance motors*

Допринос академика Илије Обрадовића (1911–2010)



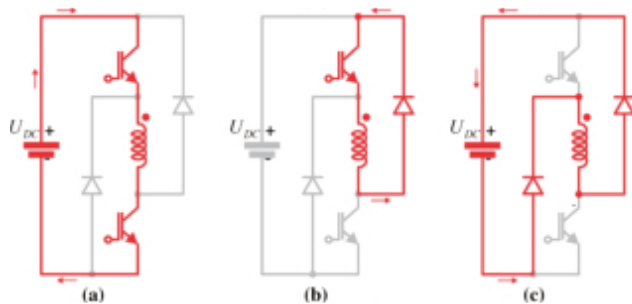
Академик Илија Обрадовић (1911–2010) је био електроинжењер који је дао значајне доприносе анализи стабилности високонапонских преносних мрежа, регулацији снаге и учестаности, регулацији електричних погона, као и пројектовању асинхроних машина, хидрауличних мотора, прекидачких релуктантних мотора и електричних машина уско повезаних са енергетском електроником.

Прекидачки релуктантни мотори (ПРМ) су једноставне конструкције, робусни су и развијају велики специфични моменат. За разлику од асинхроних мотора, ПРМ не раде на принципу Теслиног обртног магнетског поља. Електромагнетски моменат се ствара захваљујући промени отпорности магнетског кола приликом обртања анизотропног ротора. Рад ПРМ је суштински повезан са енергетском електроником, наиме, мотор не може радити без нарочитог уређаја енергетске електронике, без ПРМ конвертора.



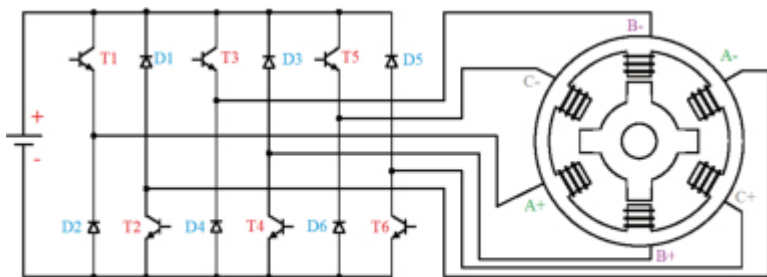
Изглед ротора и статора прекидачког релуктантног мотора

За разлику од Теслиног асинхроног мотора, који се може напајати из електричне мреже, ПРМ се напаја из засебног извора (ПРМ-конвертора) који уобличавају напоне и струје на крајевима намотаја како би се добили жељени моменат и брзина обртања. Конвертор садржи снажне полупроводничке прекидаче и диоде.



Прекидачка стања енергетског претварача за напајање прекидачког релуктантног мотора

Академик Илија Обрадовић је био зачетник примене енергетске електронике у електричним погонима са прекидачким релуктантним машинама. Дао је значајан допринос пројектовању топологија ПРМ и уређаја енергетске електронике за напајање ПРМ. У сарадњи са компанијом Емерсон Електрик у Сент Луису развијене су асиметричне топологије ПРМ које решавају проблеме рада ПРМ у режиму константне снаге, што је до тада била главна препрека њихове шире примене у електричној вучи, електропривреди и индустрији. Идеје академика Обрадовића мотивисале су велики број истраживача да се посвете усавршавању погона са ПРМ који обједињују електромеханичко претварање енергије унутар електричних машина и претварање енергије уз помоћ полупроводничких прекидача снаге која се одвија унутар уређаја енергетске електронике.



Прекидачки релуктантни мотор конфигурације 6/4 са полумостним ПРМ конвертором



Биографија академика Илије Обрадовића



Уређај енергетске електронике за напајање прекидачких релуктантних мотора



Промена магнетског поља у магнетском колу прекидачких релуктантних мотора (резултати FEM анализе)

Енергетски претварачи са тиристорима *SCR static power converters*



Допринос академика Петра Миљанића (1927–2015)

Академик Петар Миљанић (1927–2015) је био електроинжењер, метролог, изумитељ и конструктор чија су дела и данас присутна у водећим светским и домаћим лабораторијама и институтима. Као универзитетски професор формирао је прве предмете у области енергетске електронике. Његова предавања о електронском управљању процесима претварања енергије су утицала на формирање генерација машинских и електроинжењера и одредила њихова стручна и научна усмерења.

Оснивач је примене тиристорске технике у нашој земљи. Пројектовао је низ оригиналних претварачких топологија са тиристорима међу којима су најпознатије *краткоспајајући инвертор*, *подсинхроне каскаде* и *инвертор са средњом тачком*. Организовао је прве истраживачке тимове и руководио њиховим радом. Уз подучавање и упућивање подмлатка, бавио се и непосредним пројектовањем и начинио читав низ решења која се и данас користе. Његово искуство у градњи тиристорских уређаја је помогло да електрана Ђердап добије савремен и поуздан побудни систем.



Хидроелектрана Ђердап 1

Регулација побуде је веома значајна за стабилизацију напона који дају електране. Приликом пројектовања регулационог система за електрану Ђердап, руски конструктори су планирали примену сложеног и недовољно поузданог система са живиним усмерачима. Планови су укључивали и градњу фабрике живиних усмерача у близини електране, јер им је животни век био кратак и морале би се често мењати.



Живини усмерачи

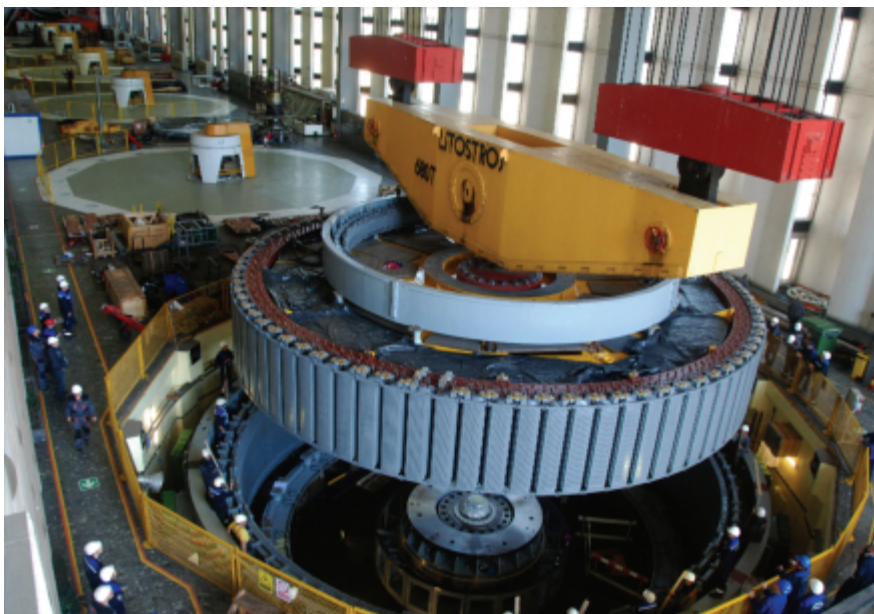
На бази искуства академика Петра Миљанића, електрана Ђердап је добила савремени тиристорски систем побуде, што је у то време био значајан продор и унапређење у градњи електрана. Својим оригиналним конструкцијама је омогућио да се велики број уређаја енергетске електронике и електричних погона произведе у земљи. Оснивач је Саветовања о енергетској електроници и организатор првог скупа који је одржан 1973. у САНУ. Саветовање о енергетској електроници доцније је прерасло у *International Symposium Power Electronics*.



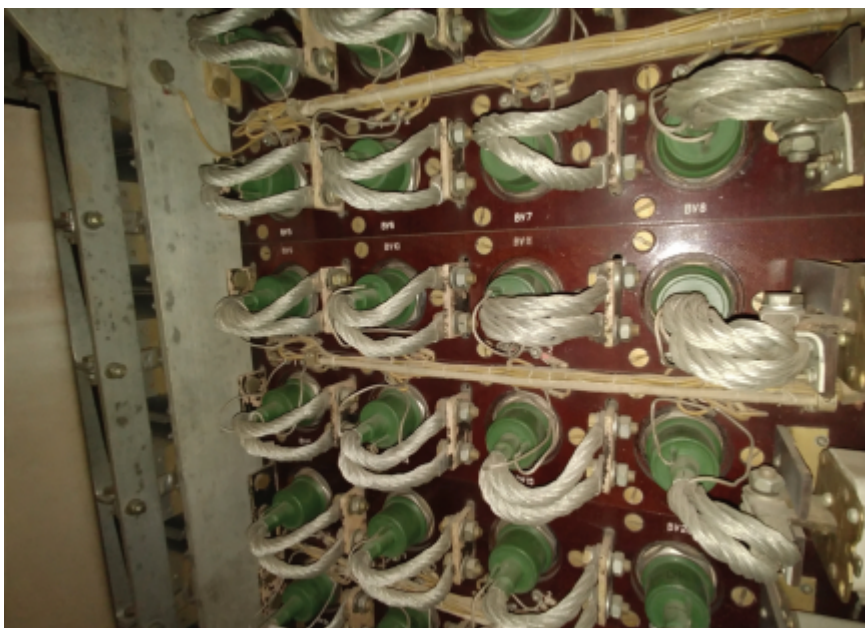
Тиристор из шездесетих година



Савремени тиристор



Хидрогенератори у електрани Ђердап



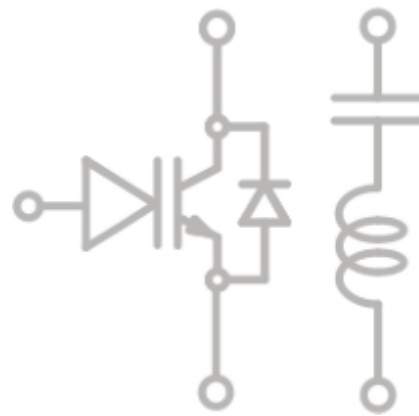
Тиристорни у оквиру побудног система ХЕ Ђердап



Биографија академика Петра Миљанића



Бити користан – мото сарадника Института
„Никола Тесла“ (академик Петар Миљанић)



Микропроцесорско управљање тиристорским претварачима *Microprocessor control of SCR static power converters*

Допринос професора Владана Вучковића (1928–2006)



Професор Владан Вучковић (1928–2006) је био електроинжењер и зачетник примене микропроцесора у пољу управљања тиристорским енергетским претварачима. Професор Вучковић је предавао на електротехничким факултетима у Новом Саду, Нишу и Београду и био директор Центра за аутоматику и регулацију у Институту „Никола Тесла“. Током четрдесетогодишњег рада у радио је на развоју енергетских претварача и електричних погона и руководио истраживачким тимом чији су чланови стекли препознатљиво име у области енергетске електронике. Током рада на Универзитету основао је и предавао низ предмета везаних за енергетску електронику и електричне машине: *Енергетска електроника*, *Електрични погони*, *Микропроцесорско управљање у енергетици* и други. Објавио је преко 100 научних радова и три уџбеника.

Почетком седамдесетих година, интересовања професора Вучковића се шире на сасвим нову област, на примену првих микрорачунара у пројектовању енергетских претварача, и примену микропроцесора у управљању енергетским претварачима.

Рачунар HP85 коришћен за потребе симулације рада енергетских претварача током осамдесетих година 20. века



Професор Вучковић је руководио изработом првих дигиталних контролера коришћених за управљање тиристорским претварачима који су пројектовани и израђивани у Институту „Никола Тесла“. За 8-битни микроконтролер MC6800 писао је прве управљачке програме у асемблеру и организовао оспособљавање млађих инжењера за примену дигиталног управљања.



Микропроцесор MC6800 коришћен у управљању тиристорским исправљачима током осамдесетих година 20. века

Професор Вучковић је један од оснивача Саветовања о енергетској електроници. Први скуп је одржан 1973. у САНУ и убрзо прераста у *International Symposium Power Electronics*.



Енергетски претварачи пројектовани у Институту „Никола Тесла“ за примене у електропривреди



Конференција о енергетској електроници
(Ее 2019, IEEE Xplore)



Биографија и библиографија
проф. Владана Вучковића (Википедија)

Цаја

САЈА– nickname of legendary professor of Electronics at the University of Belgrade



Допринос професора Славољуба Марјановића (1938–2010)

Професор Славољуб Марјановић је генерацијама студената и колега познатији као Цаја, легендарни професор електронике који је своју каријеру започео у историјском тренутку када су полупроводнички елементи заменили електронске цеви. Уследио је развој који је дао савремене рачунаре, унапредио телекомуникације и аутоматику, утицао на промене у начину живота и на велике промене у друштву. Професор Марјановић је сагледао потенцијал ове технолошке револуције и у складу са тиме радикално модернизовао наставу.

На Електротехничком факултету у Београду предавао је захтевне предмете и инсистирао је на разумевању градива. Мала пролазност је била изазов за студенте који су после положеног испита били способнији, јачи и спремнији да се суоче са практичним проблемима. Програм предмета *Електроника* ослањао се на претходно савладано градиво које је повезивао у јединствену целину. Говорећи о односу броја студената који изађе на испит код Цаје и студената који су испит успешно положили, студенти су правили поређење са напоном и струјом инверзно поларисане диоде.

Велики број његових студената су данас успешни стручњаци у земљи и у иностранству, многи су угледни професори светски познатих универзитета док су други инжењери у електронској индустрији. Њихов број и квалитет показују да је мисија професора Славољуба Марјановића успешно остварена.

Поред рада у просвети, Цаја је радио на бројним пројектима за потребе привреде. Успоставио је везу са домаћом наменском индустријом и ангажовао значајан број истраживача на развоју уређаја енергетске електронике за војску. Био је руководилац пројекта позиционог серво система за покретање куполе тенка М84, позиционог серво система за позиционирање радарске антене и других примена где се користе електрични мотори напајани из уређаја енергетске електронике. Неговао је дијалог и борбу мишљења. Његови сарадници су имали слободу и подстицај да са њим дискутују, да му противурече и да доказују своје ставове. Провокативним питањима је наводио колеге на размишљање. Високо је ценио цивилизацијске тековине, пре свега науку. Дивио се елегантним решењима. Стално је пратио развој струке и радовао се новом и бољем.



Професор Марјановић је био руководиоца пројекта позиционог сервосистема за покретање куполе тенка М84



Катедра за електронику ЕТФ

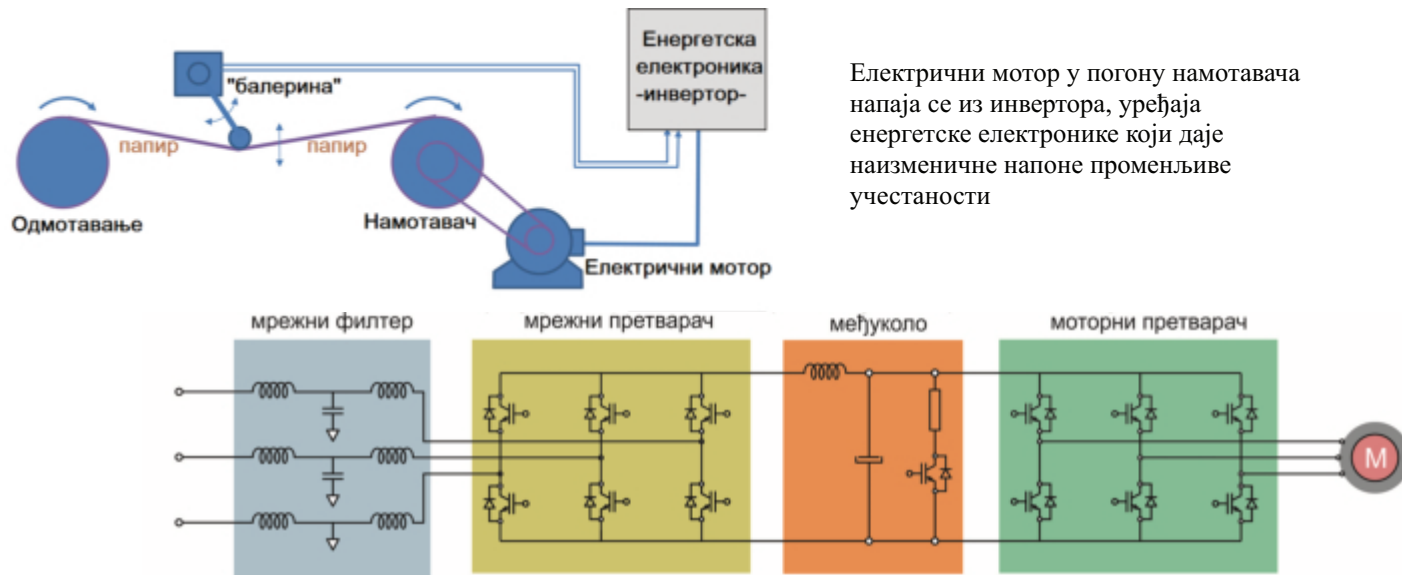
Развитак и пренос енергетске електронике у индустрији Development and transfer of Power Electronics to industry



Допринос професора Војислава Стефановића (1940)

Професор Војислав Стефановић је један од установитеља енергетске електронике у њеној раној фази развоја (1975–1985). Увео је један од првих наставних програма за енергетску електронику 1976. на Конкордија Универзитету у Монреалу. Зачетник је шире примене енергетске електронике у индустрији.

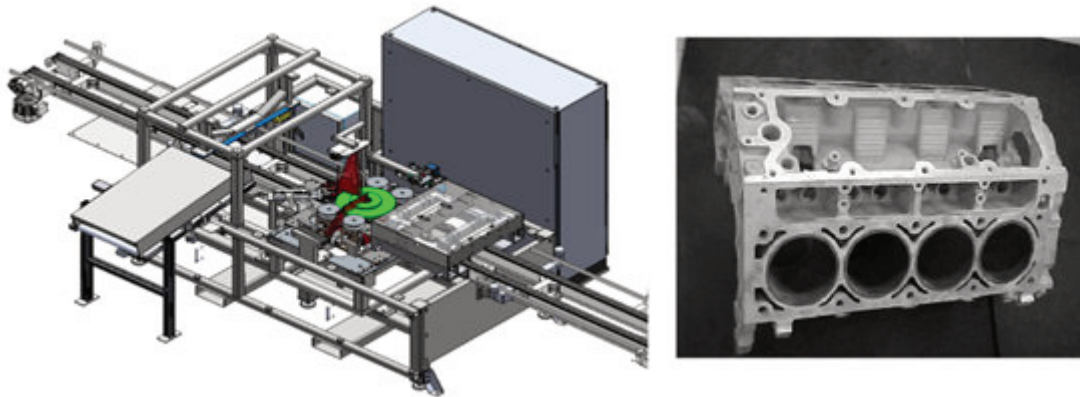
Многи индустријски процеси захтевају подешавање брзине кретања алата и предмета обраде, што се постиже променом брзине покретачких електромотора. За регулацију брзине неопходно је напајати моторе из уређаја енергетске електронике. Један од примера је намотавач у производњи хартије, где је постепени раст пречника ваљка праћен смањењем брзине обртања како би сила затезања радног материјала остала непромењена. Поред погона за производњу хартије, проблем намотавања се јавља и у текстилној индустрији, ваљаоницама челика и многим другим.



Уређаји енергетске електронике у електричном погону

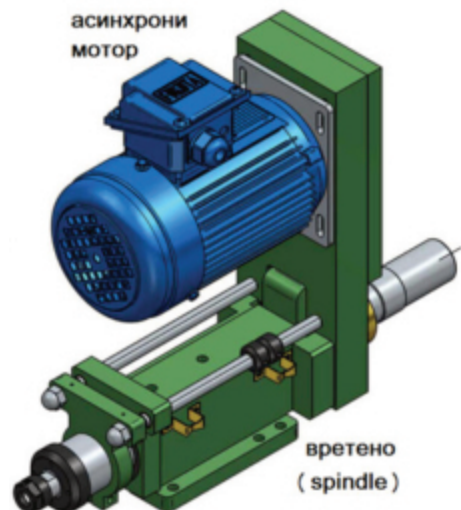
Напајање електромотора променљиве брзине ослања се на енергетску електронику

Руководио је тимом за аутоматизацију фабрика у оквиру компаније General Electric који је 1983. године развио први индустријски серво погон на свету са Теслиним асинхроним мотором. Погон AC200 је развијен за позиционирање алата за рад на моторним блоковима на покретној траци.

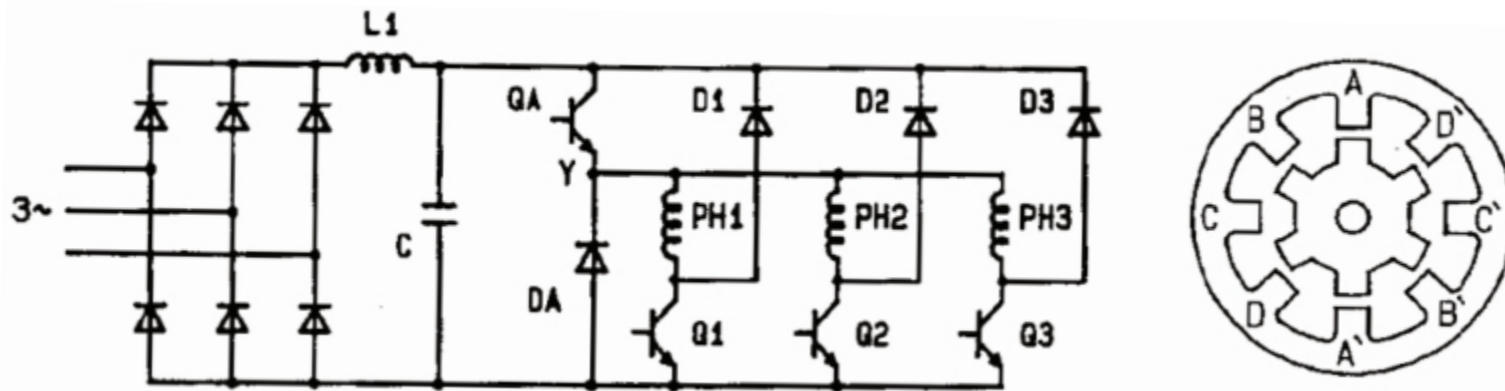


Производна линија (лево) за производњу блока мотора (десно)

Као генерални директор у компанији Electro-Craft заслужан је за настанак дигитално управљаног електричног погона BRU 200-500 који се од 1995. користи за серво примене и за покретање вретена. Серво погон користио је синхрони мотор са сталним магнетима, а вретено асинхрони мотор. Услед велике брзине обртања вретена требало је решити проблеме пројектовања уређаја енергетске електронике који напајају мотор напонима и струјама врло великих учестаности као и проблеме управљања струјама, покретачким моментом и флуksom при великим брзинама рада и великим учестаностима напајања.

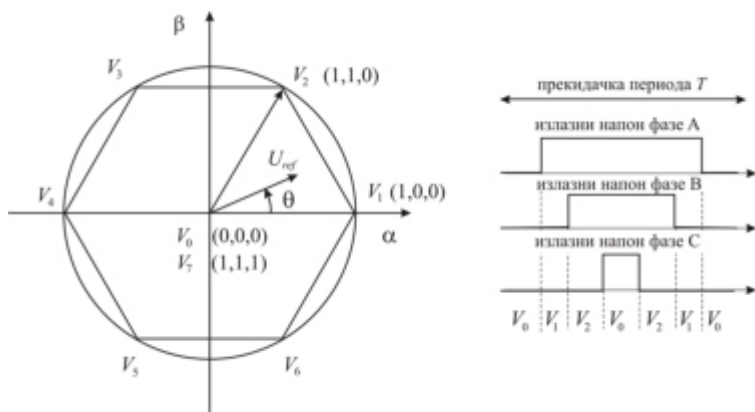


Као технички директор одељења за електромоторне погоне са регулисаном брзином обртања, у компанији Emerson Electric руководио је развојем електричних погона са прекидачким релуктантним моторима (ПРМ) и дао непосредни допринос развоју нових топологија енергетских претварача.



Енергетски претварач (лево) за напајање ПРМ (десно)

Од 1989. до 1993. је у Италији и ради као технички директор предузећа SIEI Peterlongo, а потом као генерални директор Викерсове фабрике серво мотора са сталним магнетима Polimotor и фабрике серво електронике ELGE. Поред обављања одговорних дужности директора и пласирања најмодернијих индустријских и серво погона, дао је и непосредни допринос у пројектовању алгорита space vector модулације за управљање прекидачким транзисторима снаге. По повратку у Америку наставља да доприноси енергетској електроници радећи као консултант и професор уз несебичну помоћ млађима.



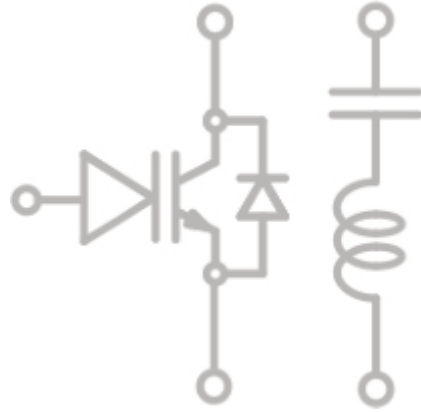
Прекидачка стања и облици фазних напона код примене space vector модулације



Биографија проф. Војислава Стефановића



Библиографија проф. Војислава Стевановића



Модуларни претварачи велике снаге *Large power modular converters*

Допринос професора Дејана Шрајбера (1945–2020)



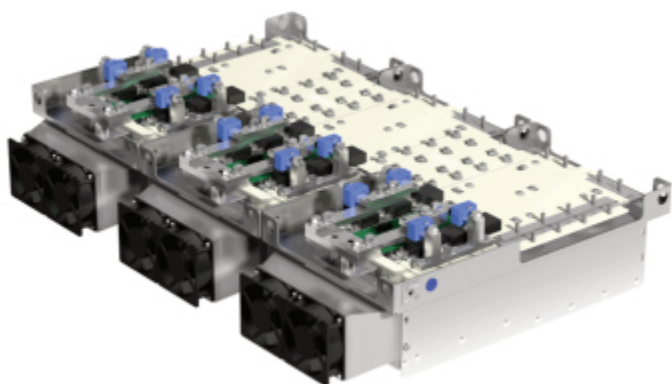
Истраживачки рад у Електротехничком институту „Никола Тесла“ (ИИТ) је током седамдесетих и осамдесетих година двадесетог века био обележен значајним достигнућима у пољу енергетске електронике. Оптимизација тиристорских претварача и прва решења претварача велике снаге са биполарним транзисторима омогућила су развој уређаја и система чије су карактеристике премашиле решења настала у лабораторијама водећих светских компанија, што је допринело значајном извозу уређаја енергетске електронике.

Водећи инжењер и творац већине техничких решења био је Дејан Шрајбер, талентовани, јасно види и неуморни електроинжењер, проналазач и научник који је иза себе оставио више од 50 научних радова, више од 20 међународно признатих патената и стручни подмладак који и данас примењује његове вредне савете и поуке.

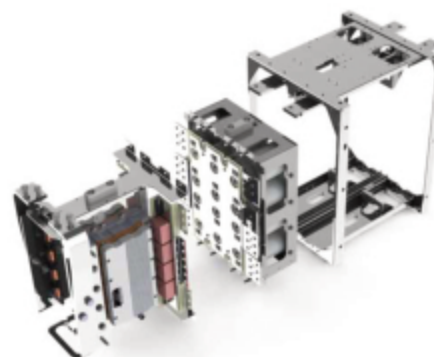


Полупроводници снаге компаније Семикрон

Професор Шрајбер одлази у Немачку 1989. и придружије се развојно-истраживачком центру фирме SEMIKRON International GmbH у Нирнбергу. Све до 2010. радио је као директор групе за примену полупроводничких прекидача (Senior Application Manager). Дао је значајан допринос увођењем концепта модуларних претварача (stack) сачињених тако да представљају основе градивне елементе претварача великих снага. Свака од платформи називне снаге 100 kVA сачињена је од стандардних, серијски произведених полупроводничких прекидача прихватљиве цене. Паралелним повезивањем више платформи може се остварити вишеструко већа снага без потребе да се граде атипичне полупроводничке компоненте чија би цена била оптерећена развојем и производњом у врло малим серијама. Типични примери примене оваквог модуларног концепта су вучни претварачи, претварачи за ветрогенераторе, соларне електране и системе непрекидног напајања. Од доласка у Семикрон крајем осамдесетих година па све до 2010. године, руководио је развојем више платформи као што су SEMICUBE, STACK, SKiiPSTACK-RE, SKiiP RACK.



Повезивање претварачких модула
у јединицу велике снаге



SKiiP RACK (лево) и четвороквадрантни
претварач заснован на SKiiP RACK платформи (десно),
(извор <https://www.semikron.com/products>)



Биографија проф. Дејана Шрајбера



Електротехнички институт „Никола Тесла“



SEMIKRON

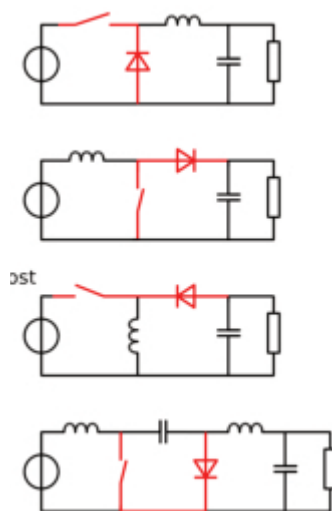
„Ћуков конвертор“ и концепт усредњавања у управљању енергетским претварачима *State-Space Averaging and the Ćuk Converter*



Допринос професора Слободана Ћука (1947)

Током касних шездесетих и раних седамдесетих година двадесетог века, постојала је потреба моделовања и управљања енергетским претварачима, али њихова динамика тада није била у довољној мери проучена. Пројектовање управљачких алгоритама и подешавање параметара регулације прекидачких извора је било изазовно и неизвесно. У исто време, постојала је све већа потреба да се начине прекидачки извори великог степена корисног дејства и велике специфичне снаге, неопходни за градњу свемирских летилица.

У својој докторској дисертацији, одбрањеној на Калифорнијском технолошком институту (Caltech), др Ћук је предложио усредњавање променљивих стања – “state-space averaging” – као приступ градњи генералисаних модела прекидачких конвертора. Захваљујући предложеном методу створена је могућност градње енергетских претварача високих перформанси који се користе за увећање енергетске ефикасности, градњу обновљивих извора и друге бројне примене.

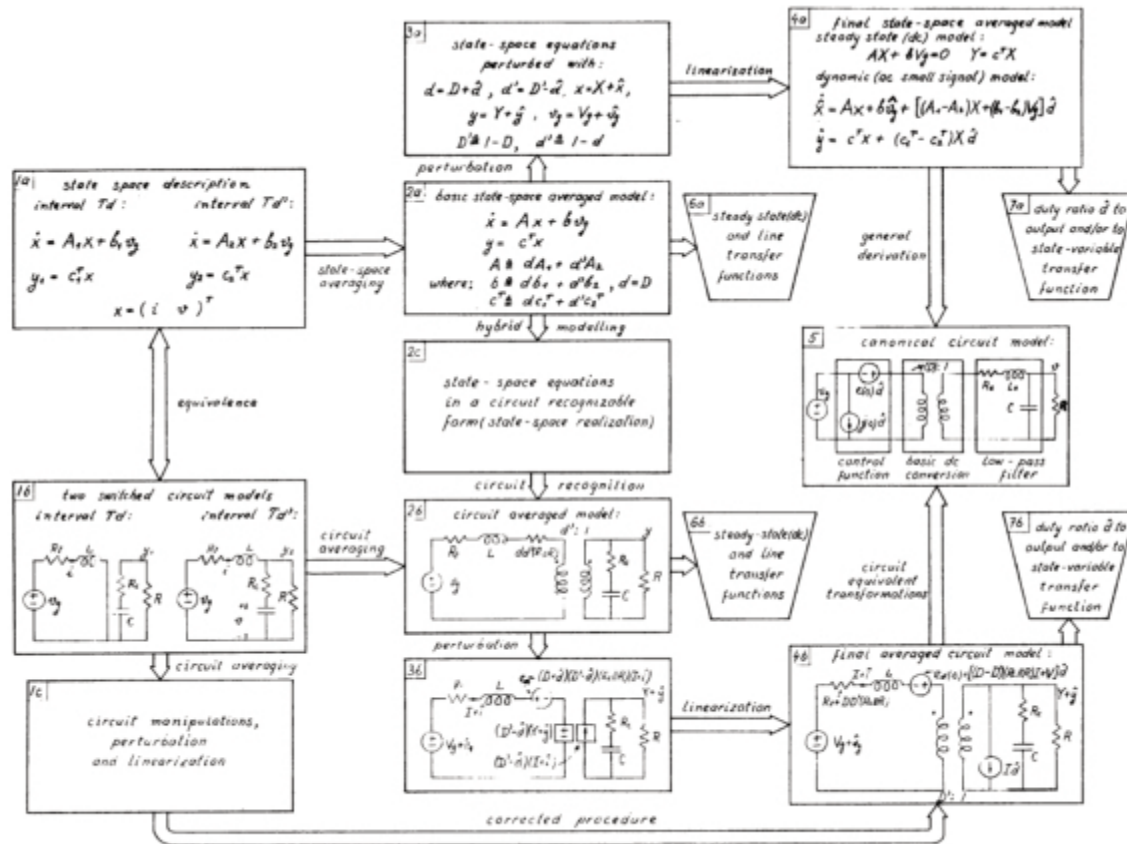


Основне топологије dc/dc конвертора: чопер спуштач,
чопер подизач, чопер обртач и Ћуков конвертор

Примена метода усредњавања у простору стања

Поред метода усредњавања, др Ђук је пројектовао нову топологију претварача која је уврштена у постојеће топологије под именом „Ћуков претварач“. Оригинална топологија Ћуковог dc/dc претварача укључује магнетску спрегу улазног и излазног степена и интеграцију магнетских компоненти какве су пригушнице и трансформатори. Захваљујући магнетској спрези могуће је остварити претварач велике специфичне снаге и малог степена валовитости улазних и излазних струја.

Др Ђук и његови студенти на Универзитету Калтек дали су читав низ значајних доприноса у пољу енергетске електронике. Др Ђук је 1979. године основао компанију TESLACO која је заједно са компанијом Honeywell произвођила Ћукове претвараче за свемирски програм ORION у оквиру свемирске агенције NASA.



Teslaco

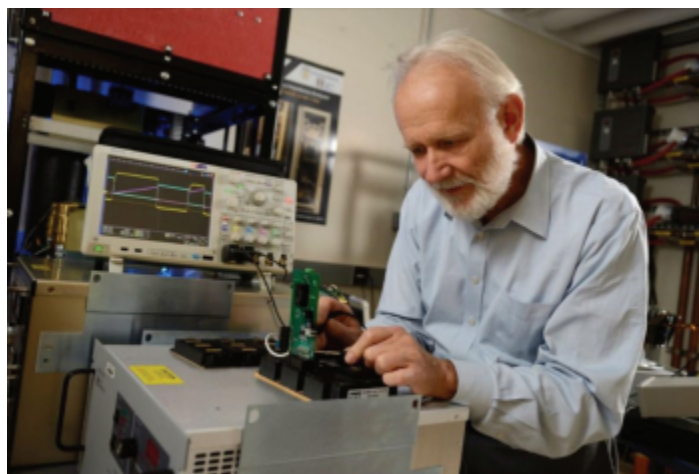
Примена метода усредњавања у простору стања

Електронски системи за дистрибуцију електричне енергије *Electronic systems for distribution of electric power*

**Допринос професора Душана Боројевића (1952)
Бредли одељење за електротехнику и рачунарство,
Вирџинијски политехнички институт и
државни универзитет, Блексбург, Вирџинија, САД**



Енергетска електроника се све више користи у повезивању извора електричне енергије на мрежу. Све више потрошача је електронски контролисано и садржи уређаје енергетске електронике као интерфејс. У пољу дистрибуције електричне енергије, стандардне дистрибутивне мреже, трансформатори и њихови проблеми се постепено замењују електронском енергетиком. У оквиру Бредли одељења за електротехнику и рачунарство Вирџинијског политехничког института и државног универзитета, професор Боројевић је водио бројне истраживачке пројекте у областима мултифазних енергетских претварача, електронских система за дистрибуцију електричне енергије, моделирања и управљања, као и мултидисциплинарне оптимизације претварачких кола.



Професор Душан Боројевић у лабораторији



Неки примери хардвера развијених у центру за индустрију које је проф. Боројевић развио са својим студентима у последњих неколико година

Од 1998. године је помоћник директора Центра за системе енергетске електронике, који је до 2008. године финансиран од америчке Националне фондације за науку као први национални истраживачки центар за енергетску електронику. Центар је постао најпознатија светска академска институција у области енергетске електронике и у њему данас ради 10 професора, више од 60 постдипломских студената и преко 20 истраживача у гостима, у сарадњи са више од 80 компанија из целог света. Др Боројевић је сада директор центра са звањем угледног професора универзитета и ангажован је као помоћник проректора универзитета за истраживање и иновације. Дао је значајан допринос развоју нано, микро и мили мрежа.



Хијерархијска мрежа динамички развојених електронски повезаних подсистема „Интер-мрежа“

Професор Боројевић руководио је израдом више од 45 докторских дисертација и 45 магистарских теза и коаутор је скоро 1.000 научних публикација које су цитиране преко 33.000 пута. За своја достигнућа добио је бројне награде и признања у САД, Европи и Кини. За доприносе управљању, моделирању и пројектовању енергетских претварача у електроенергетици и транспорту, професор Боројевић је изабран за члана америчке Националне инжењерске академије.



Биографија проф.
Душана Боројевића



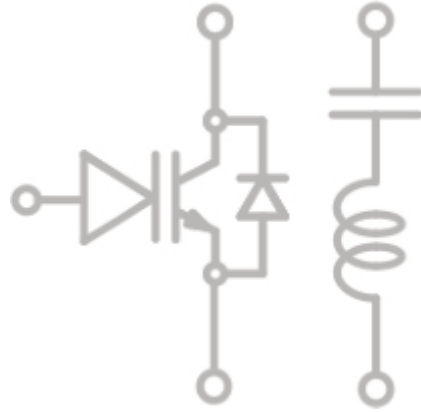
Designing high-power-density
power electronics for
transportation application



Future power electronics energy systems
(Johnsson School
Distinguished Lecture Series)



Електроенергетски системи будућности
(Electronic Energy Systems of the Future),
текст



**Енергетска електроника у серверима,
телекомуникационој опреми, преносивим
рачунарима и у електричним возилима**
*Switched-mode power electronics in portable computers,
data centers and electrical vehicles*



Допринос професора Милана М. Јовановића (1952–2018)

Технологије и решења која је развио Милан Јовановић са својим истраживачким тимовима данас се користе у милионима прекидачких напајања које производи Делта као и друге компаније. Његова решења доприносе значајним уштедама енергије, материјала и смањењу електронског отпада.

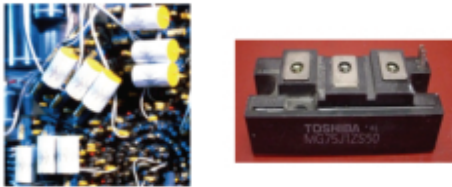
Дело професора Јовановића настављају хиљаде истраживача који раде у области енергетске електронике и који су били инспирисани његовим проналасцима.

Из поштовања према доприносима професора Јовановића, истраживачка лабораторија компаније Делта у Северној Каролини је добила име Milan M. Jovanović Power Electronics Lab (MPEL).

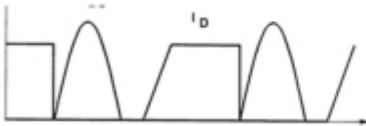
Рад Милана Јовановића обележен је настојањем да се свет начини више зеленим. Његова достигнућа у развоју и усавршавању ас/дс претварача и развој нових архитектура, топологија и закона управљања допринели су оптималном коришћењу полупроводничких направа и пасивних компоненти.

Професор Милан Јовановић је члан Америчке националне инжењерске академије и IEEE Fellow. Публиковао је више од 300 радова у области енергетске електронике и има највећи број цитата међу свим истраживачима из индустрије који раде у области енергетске електронике.

Моделовање и евалуација полупроводничких направа



Квази-резонантни претварачи



Електроника за аутомобиле



AC/DC прекидачка напајања за рачунарску и телекомуникациону опрему

DESKTOP



TELECOM



SERVER



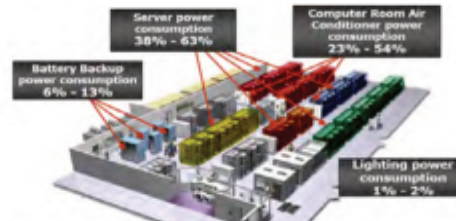
Модули за регулацију напона



NOTEBOOK ADAPTER



Напајање рачунарских центара



LED DRIVERS



Главни допринос професора Милана Јовановића



Биографија проф. Милана М. Јовановића



Delta Digest
Milan M. Jovanović's Work and Impact
on the Power Electronics Industry



PPT презентација (енглески језик)

Прекидачка напајања за рачунаре и рачунарске системе *Switched mode power supplies for data processing equipment*

Допринос др Ласла Хубера (1953)

Лабораторија за енергетску електронику Милан М. Јовановић
Delta Electronics (Americas) Ltd.
Durham, Северна Каролина, САД

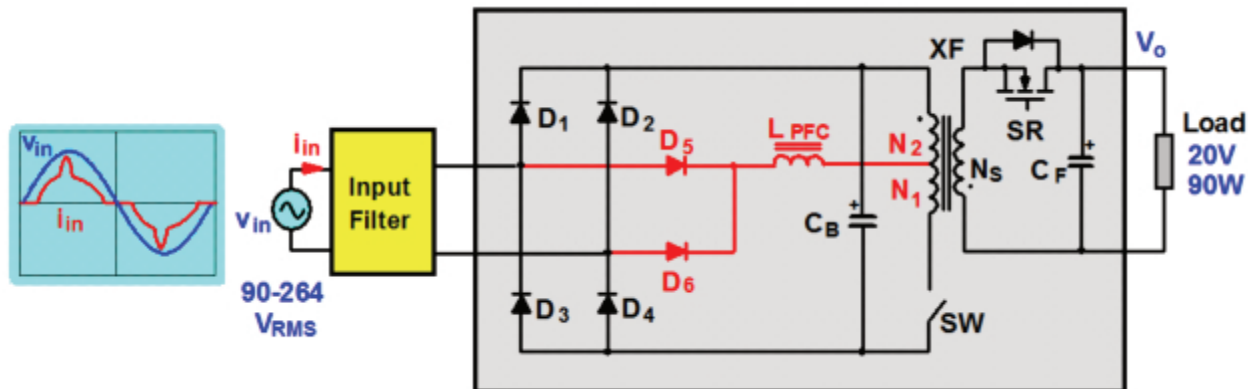


Адаптер за напајање преносних рачунара је веома често коришћени енергетски претварач који преузима енергију из напојне мреже (обично је то мрежа 220V 50 Hz) и претвара је у једносмерни напон од двадесетак волти, потребан за напајање преносне рачунарске опреме и за пуњење одговарајућих батерија. Услед двостепеног претварања, први адаптери су имали релативно мали степен корисног дејства, значајни губици су се претварали у топлоту, док је струја преузимана из мреже имала велика изобличења.



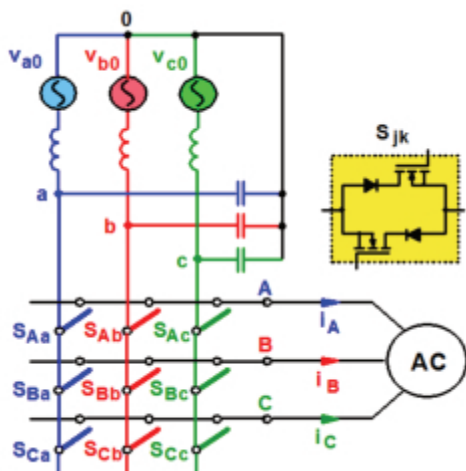
Адаптер за напајање преносних рачунара

У оквиру компаније Делта, Ласло Хубер је пројектовао адаптер са само једним претварачким степеном. Поред веће ефикасности и мањих губитака, предложени претварач је узимао мрежну струју много ближу простопериодичном облику. Нова адаптерска технологија била је једина једноступена адаптерна технологија са корекцијом фактора снаге (*Power Factor Correction – PFC*) у индустрији извора напајања за преносне рачунаре која је задовољила стандардне спецификације ЕН61000-3-2 за хармонике линијске струје са ефикасношћу од око 90%. За 15 година ова технологија адаптера је имплементирана у више од 15 милиона адаптера за преносне рачунаре.



Једностепени претварач за напајање преносних рачунара

Ласло Хубер је светски познат стручњак за оптимизацију перформанси прекидачких напајања намењених рачунарима и рачуарској опреми. Значајно је допринео унапређењу перформанси прекидачких извора за напајање преносиве рачуарске и електронске опреме. Од 1994. године, AC/DC исправљачи који укључују Хуберове изуме масовно су примењени у преносним рачунарима и таблетима произвођача IBM-а, HP-а, Dell и Apple, као и у Сони конзолама за игре. Поред рада на рачунарским напајачима, дао је значајан допринос у пољу техника модулације за матричне претвараче, управљачких алгоритама за смањење акустичне буке енергетских претварача, *interleaving-boundary-boost* решења за претвараче са корекцијом фактора снаге у режимима континуалног и дисконтинуалног провођења као и бројне доприносе у другим пољима.



Матрични претварач



Шири PPT приказ



Биографија



Библиографија

Квалитет електричне енергије

Међународни симпозијум Енергетска електроника

Electric Power Quality

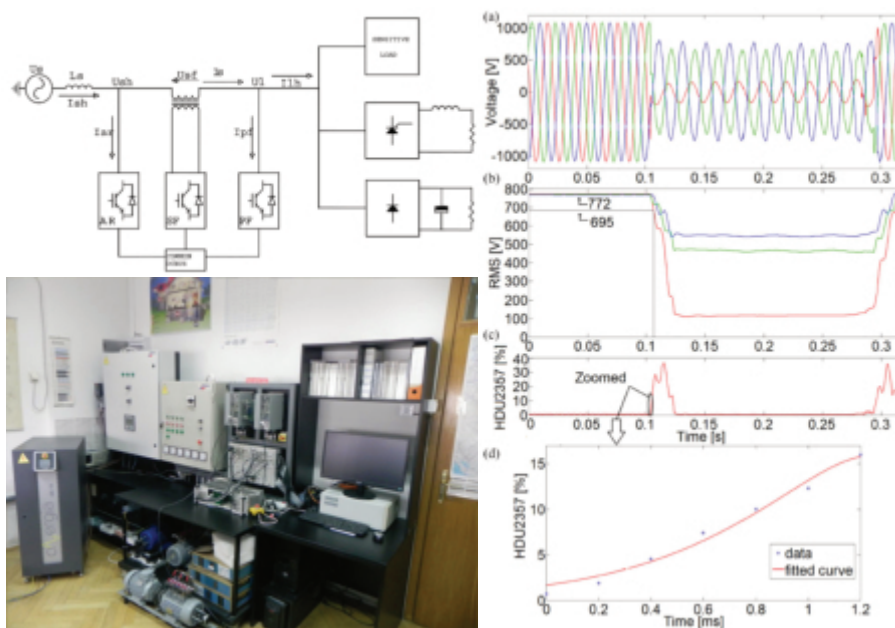
International Symposium on Power Electronics



Допринос професора Владимира Катића (1954)

Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Нови Сад, Србија

Све већи број извора и потрошача се прикључује на мрежу преко мрежних претварача, уређаја енергетске електронике који напоне и струје мреже прилагођавају потребама и електронски контролисаних извора и потрошача. На путу ка паметним мрежама, електроенергетика се полако претвара у електронску енергетику. Поред низа предности, прикључењем уређаја енергетске електронике у мрежу уносе се поремећаји и нежељене компоненте напона и струја. Проучавање наведених проблема и налажење решења обухваћени су појмом *квалитет електричне енергије*. Проф. др Владимир Катић је један од првих истраживача квалитета електричне енергије у бившој СФР Југославији. Дао је значајан допринос проучавању виших хармоника и пропада напона у дистрибутивној мрежи, предложио увођење нових дигиталних метода мерења и анализе и формулисао математичке методе за детекцију и класификацију поремећаја (*Harmonic Footprint*).



Шема Универзалног система за кондиционирање квалитета (лево-горе, 2000), Хармонијски отисак (десно, 2018) и експериментална поставка за примену за детекцију пропада напона (лево-доле, 2013)

Проф. Владимир Катић је организатор и председавајући чувеног саветовања/симпозијума „Енергетска електроника“, чији је покровитељ и САНУ. Први скуп је одржан 1973. у Београду као „Саветовања о енергетској електроници“ на иницијативу академика Петра Миљанића и професора Владана Вучковића. Скуп убрзо прераста у југословенску конференцију о енергетској електроници. Проф. Катић преузима организовање симпозијума који и данас окупља истраживаче из Србије и велики број гостију са свих континената. Професор Катић је 1997. године био један од оснивача Друштва за Енергетску електронику, које има за циљ организовање научних скупова и успостављање блиске сарадње истраживача и представника индустрије.



Симпозијум о енергетској електроници је 2013. године прославио четрдесет година од оснивања



Биографија др Владимира Катића
(Факултет техничких наука, Универзитет у Новом Саду)



Biography and References

**Развој контроле вишефазних инвертора
и електромоторних погона**
Control of multiphase inverters and variable-speed drives



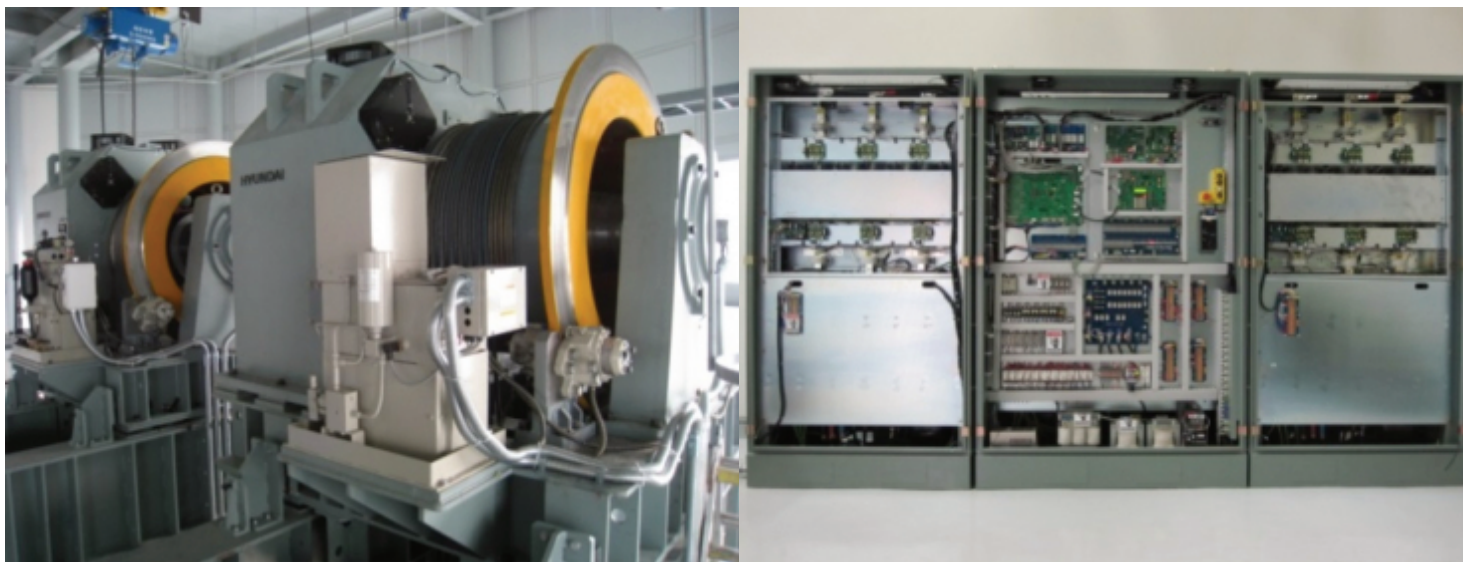
Допринос професора Емила Левија (1958)
Liverpool John Moores универзитет у Ливерпулу

Вишефазне електричне машине раде на принципу обртног магнетског поља док на статору имају више од три фазе, најчешће барем пет. Уз већи број фаза остварују се техничка решења и карактеристике које су недоступне код трофазне машине. Док код трофазне машине постоје две независне струје, код петофазне их има четири. Уз два степена слободе потребна за управљање моментом и флуksom преостају још два која се могу користити за оптимално пројектовање енергетске електронике за напајање машине или за побољшање перформанси погона. Коначно, уз већи број фаза смањује се ефективна вредност струје у намотајима.



Статор петофазне машине фазни намотаји, крајеви намотаја, прикључци

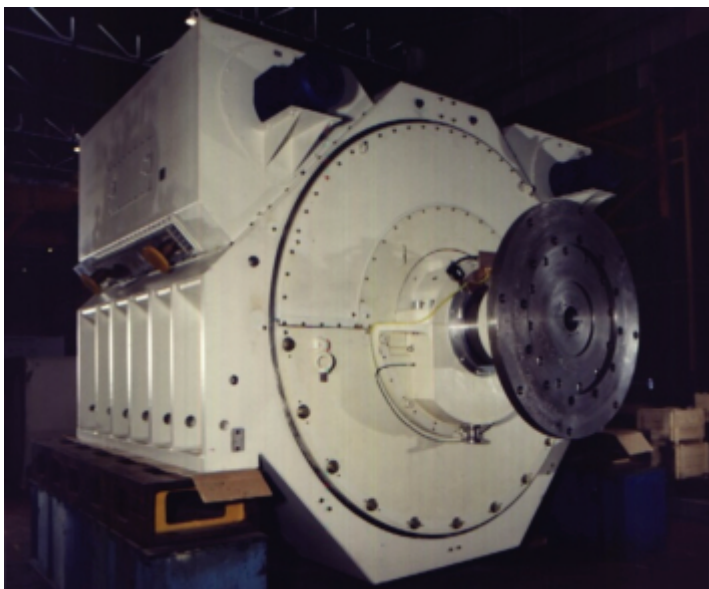
Међу значајна достигнућа проф. Емила Левија остварена са његовим тимом истраживача у Ливерпулу спада и независно управљање серијски повезаних вишефазних машина напајаних из једног инвертора, технике модулације вишефазних инвертора које обезбеђују простопериодичне излазне напоне, управљачка решења за случај испада једне или више фаза, коришћење вишефазних машина у оквиру интегрисаних *on-board* пуњача батерија на електричним аутомобилима, као и увећање специфичног момента коришћењем инјектованих хармоника струје.



Деветофазна машина за електричну вучу – Hyundai систем за брзе лифтове. Машина на левој страни је синхрони мотор снаге 1,1 MW са сталним магнетима. Конвертор (десно) садржи три back-to-back-IGBT модула. (Фотографије добијене захваљујући фирми Hyundai)



Дванаестофазни генератор за ветрењаче снаге 5 MW, намењен удаљеним фармама ветроелектрана на отвореном мору. Конвертор (десно) садржи четири back-to-back-IGBT модула. (Фотографије добијене захваљујући фирми Gamesa)



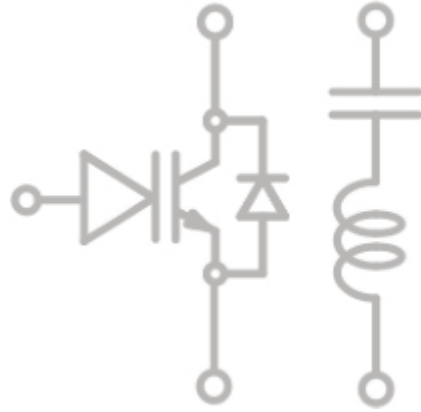
Петнаестофазни електромотор снаге 20 MW за покретање бродова на електрични погон као што су крстарице типа 45 и бродови типа QEC. Са десне стране приказана су три петофазна инвертора са IGBT транзисторима.
(Фотографије добијене захваљујући фирми General Electric)



A fully integrated on-board battery charger for Electric Vehicles (VIDEO)



Биографија и библиографија
проф. Емила Левија (Liverpool John Moores University)

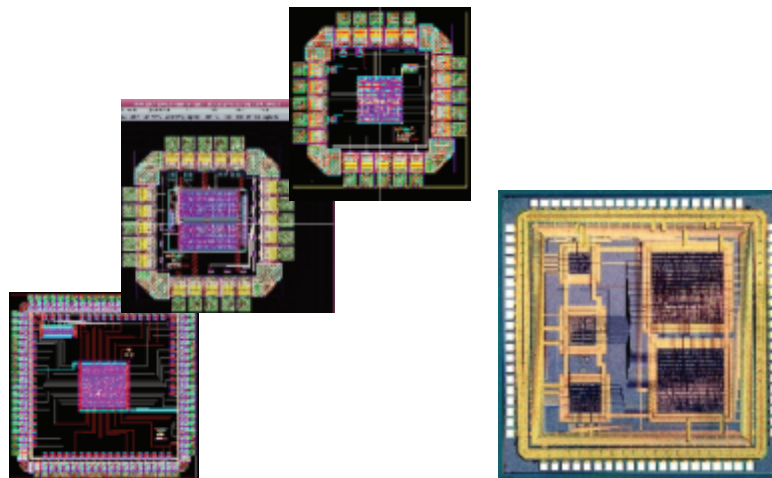


Дигитално управљање високофреквентним конверторима
*Digital Control of High-Frequency Pulse-Width
Modulated Power Converters*

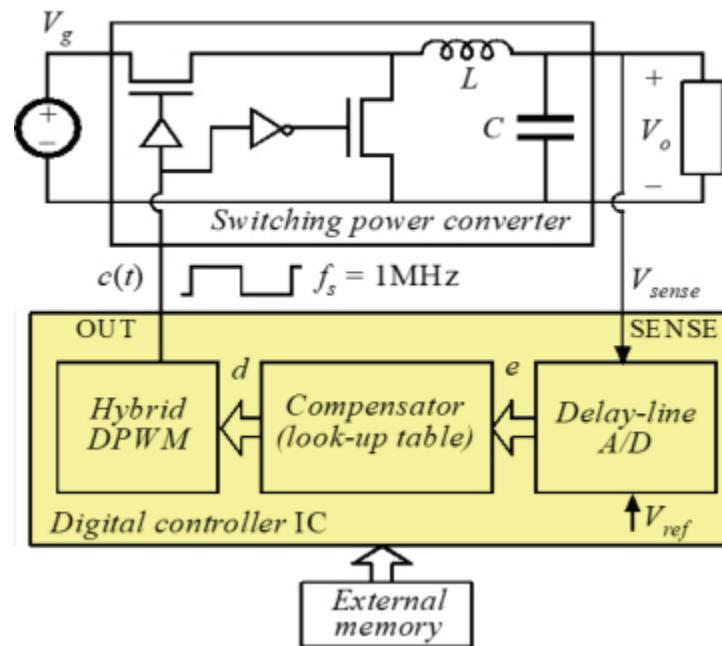
Допринос професора Драгана Максимовића (1961)
ECEE Department, University of Colorado at Boulder



Конвертори снаге са импулсно-ширинском модулацијом (ИШМ) се широко користе у електричним погонима, напајању рачунарских система, обновљивим изворима и паметним мрежама. Крајем двадесетог века, управљачка кола претварача са ИШМ су се и даље заснивала на аналогној електроници, што је ограничавало регулационе перформансе и робусност управљачких контура које обухватају конверторе снаге, док су дигитални контролери сматрани превише спорим или превише скупим за поменуте примене.



Интегрисани дигитални ИШМ контролери које су развили проф. Максимовић и његови студенти

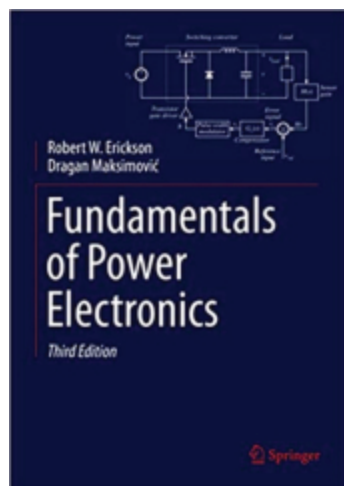


Дијаграм првог интегрисаног ИШМ контролера за високофреквентне конверторе

Професор Максимовић и његови студенти су 2000. године развили први интегрисани дигитални ИШМ контролер сачињен у јединственом чипу. Пројектовано решење је радило до прекидачких учестаности од 1 MHz. Дигитално управљачко коло је обухватало модул који имплементира модулацију ширине импулса са великом резолуцијом, програмабилни компензатор и аналогно-дигитални контролер заснован на логичким колима и линијама за кашњење. Поред осталих предности, пројектовано решење је ангажовало врло малу површину силицијума.

Развијена технологија дигитализованог модулатора ширине импулса је лиценцирана и нашла је широку примену код многих произвођача интегрисаних кола. Решења професора Максимовића присутна су у многим компанијама које се баве производњом полупроводника и данас се широко користи у мобилним телефонима, преносним и стоним рачунарима, рачунарским центрима, електричним возилима и другим системима енергетске ефикасности и обновљиве енергије.

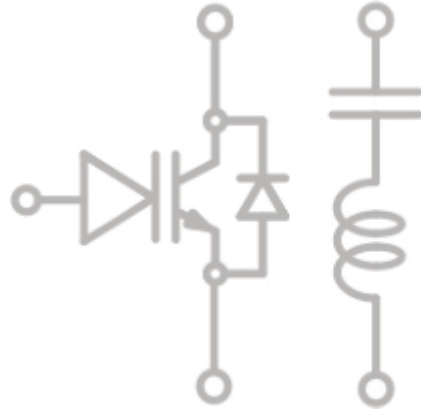
Професор Максимовић и његови студенти и сарадници увели су напредне технике управљања засноване на дигиталној имплементацији, нудећи увећање степена корисног дејства у мрежама, аутоматско подешавање одзива у контурама са аутоматском регулацијом и достизање високих перформанси уређаја енергетске електронике. Истраживања и развој су сабрана у уџбенику *Digital Control of High-Frequency Switched-Mode Power Converters* (Wiley – IEEE Press 2015), који је написао професор Максимовић заједно са проф. Корadiniјем, проф. Матавелијем и проф. Занеом. Овај уџбеник допуњава широко прихваћен уџбеник *Fundamentals of Power Electronics* (3rd edition, Springer 2020) који су написали проф. Максимовић и проф. Ериксон.



Детаљна биографија проф. Драгана Максимовића



Биографија проф. Драгана Максимовића



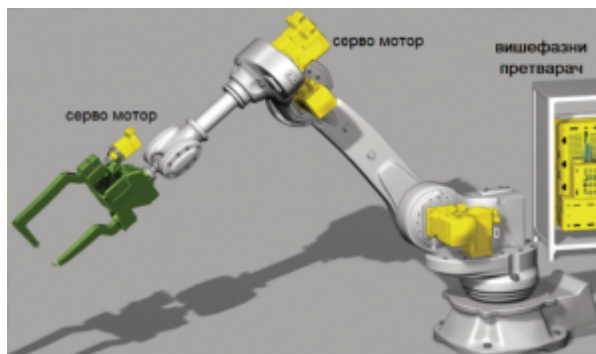
Енергетски претварачи у индустријској роботички и обновљивим изворима

Power electronics in industrial robots and ac grids

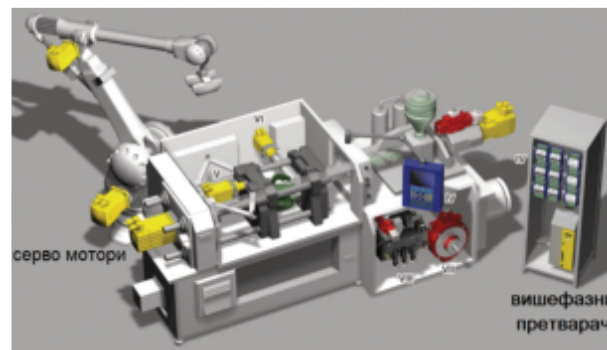
Допринос професора Слободана Н. Вукосавића (1962)
дописног члана САНУ



Развој индустријске роботике омогућује да се напорни и монотони послови препусте аутоматима, што људима даје више времена за бављење креативним послом. „Мишићи“ индустријских робота су серво мотори који се напајају из вишефазних претварача, уређаја енергетске електронике који напоне и струје прилагођавају покретима робота и производним циклусима. Претварачи преузимају енергију из електричне мреже и претварају је у облик који одговара потребама серво мотора.

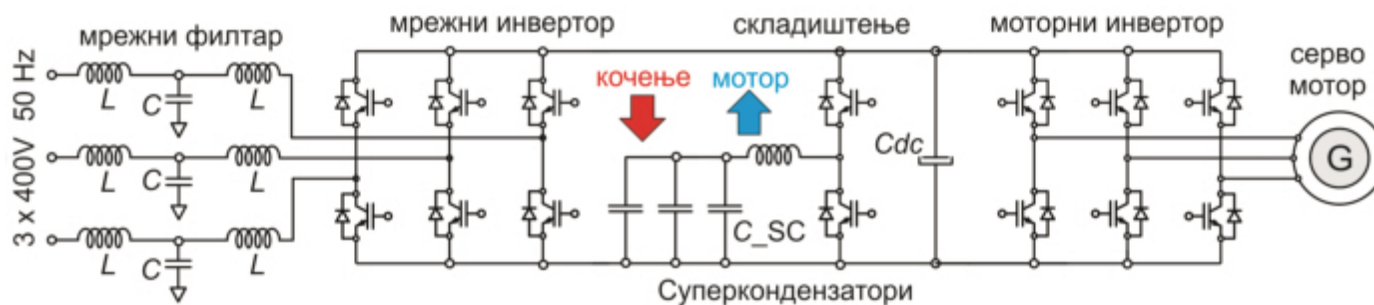


Индустријски робот у аутомобилској индустрији



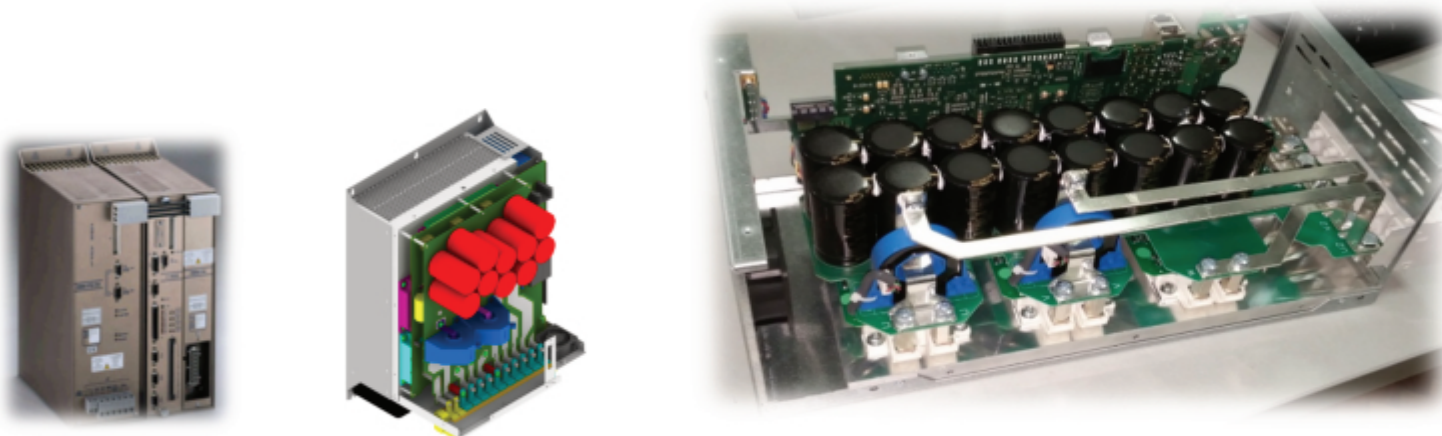
Производна ћелија за ливење под притиском

Претварачи за примене у роботички имају могућност локалног складиштења енергије. У фазама кочења, кинетичка енергија покретних делова се складишти у суперкондензаторима, да би се доцније искористила у фазама убрзања и моторног рада. Локално складиштење омогућује да се умањи вршна вредност снаге коју производна линија размењује са напојном мрежом. Приликом испада главног напајања, енергија похрањена у суперкондензаторима омогућује завршетак текућих радњи и безбедно заустављање робота.

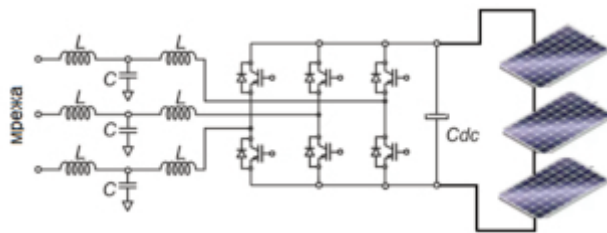


Претварач са уређајем за складиштење енергије у суперкондензаторима (CSC)

Савремени вишефазни претварачи имају степен корисног дејства већи од 99%, специфичну снагу од $8,1 \text{ kW/dm}^3$ и пропусни опсег регулатора струје од 4 kHz. Претварачке фамилије *DBM-04*, *DMS* и *DS* настале су у лабораторијама компаније *Vickers*, док је универзални претварач *DM-2020* производ компаније *MOOG*. Дописни члан САНУ Слободан Н. Вукосавић био је на челу истраживачких тимова и пројектовао главне елементе хардвера и софтвера наведених претварача. У производним постројењима европских произвођача аутомобила *Michelin*, *Renault*, *Peugeot* и *Fiat* користи се више од 80.000 претварача серије *DBM-04*, *DBS*, *DS* и *DM*. Изменом софтвера, универзални претварач *DM-2020* може се користити за претварање енергије у обновљивим изворима.



Претварачи *DBM-04*, *DS-2000* и универзални претварач *DM-2020* за примене у роботици и обновљивим изворима



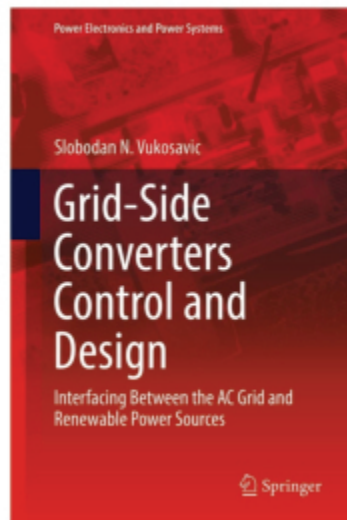
Примена универзалног претварача у електранама на сунце и ветар



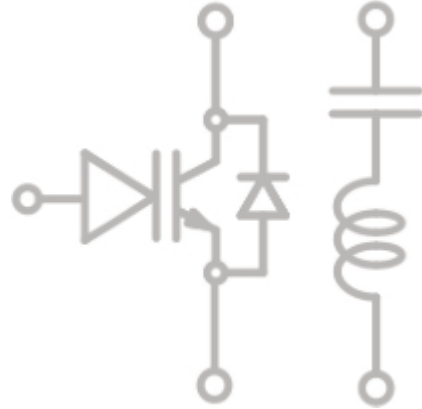
Биографија проф. Слободана Н. Вукосавића



Библиографија проф. Слободана Н. Вукосавића



Slobodan N. Vukosavic – Grid-Side Converters Control and Design



**Енергетска електроника у електрификацији
тешке индустрије**
Power electronics and large power drives in heavy industry



Допринос др Влатка Влатковића (1963)

Ценерал електрик

Тешка индустрија је кроз историју била оријентисана на механичке уређаје за обављање задатака као што су компресија гаса, транспорт терета и обрада метала. Развој енергетске електронике великих снага омогућио је примену електричних погона у обради метала, у индустрији нафте и гаса, у пољу обновљивих извора и транспорта. Током претходних 25 година, развој енергетске електронике и машинских технологија у опсегу од 1 MW до 100 MW трансформисао је многе индустрије и пружио значајне предности у погледу перформанси и ефикасности.



Прототип највеће светске турбине на ветар која производи 12 MW у *offshore* окружењу. Увећање снаге остварено је употребом средњенапонске енергетске електронике у комбинацији са генератором са сталним магнетима.



Интегрисани компресор за природни гас са електричним мотором велике брзине обртања. Рад са брзинама већим од 10000 о/мин омогућује да се замењује сложени механички систем парне или гасне турбине, мењача и компресора. Систем користи Теслин асинхрони мотор или мотор са сталним магнетима и магнетским лежајевима и средњенапонски претварач. У последњих 20 година преко 50% постројења за компресију гаса постало је потпуно електрично, што је дало значајно увећање енергетске ефикасности и смањење емисија.



Електрични бродски погонски систем „*a pod*“. Електрични мотор је интегрисан са пропелером у хидродинамички оптимизованом кућишту. Мотор се напаја из средњенапонског претварача променљиве учестаности. Електрификација морских бродова омогућава увећање ефикасности веће од 10% и бољу управљивост.

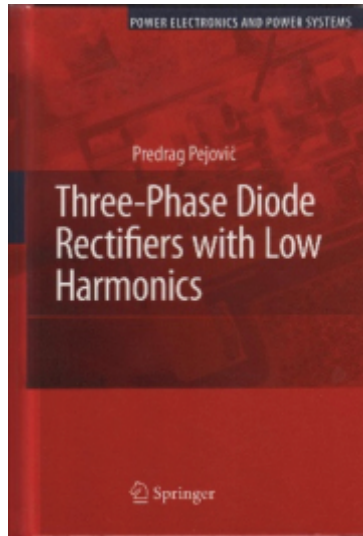


Биографија др Влатка Влатковића



Библиографија др Влатка Влатковића (IEEE Xplore)

Нова топологија диодног исправљача садржи систем спрегнутих пригушница које инјектују корективне струје на начин који мрежне струје чини ближим простопериодичном облику. Трофазни диодни исправљач са инјекцијом струје настао је током истраживања обављених у периоду од 1997. до 2013. године. Највећи број резултата публикован је у књизи: Predrag Pejović, “Three-Phase Diode Rectifiers with Low Harmonics – Current Injection Methods,” Springer, 2007,



Осим наведених главних праваца истраживања, професор Пејовић је радио још на безконтактном мерењу једносмерне струје, методама управљања, нелинеарној динамици и резонантним конверторима. Ван енергетске електронике, радио је на методама локализације корисника у бежичним телекомуникационим мрежама и у електричним мерењима, пре свега аутоматизацији мерних система. Сви постојећи *Hardware-in-the-loop* (HIL) системи користе методе које је развио професор Пејовић. Активни је поборник примене слободног софтвера. Велики број његових студената је успешно завршио постдипломске студије на познатим страним универзитетима, од којих шесторо тренутно ради у звању професора на страним универзитетима.



Радови на тему трофазних
диодних исправљача



Радови на тему рачунарски
ефикасних симулација



Биографија и библиографија
проф. Предрага Пејовића

Високопрецизне симулације система енергетске електронике и енергетике у реалном времену *Ultra-high Fidelity Real-time Simulation for Power Electronics and Power Systems*

Допринос браће др Николе Челановића (1970)
и др Ивана Челановића (1973)



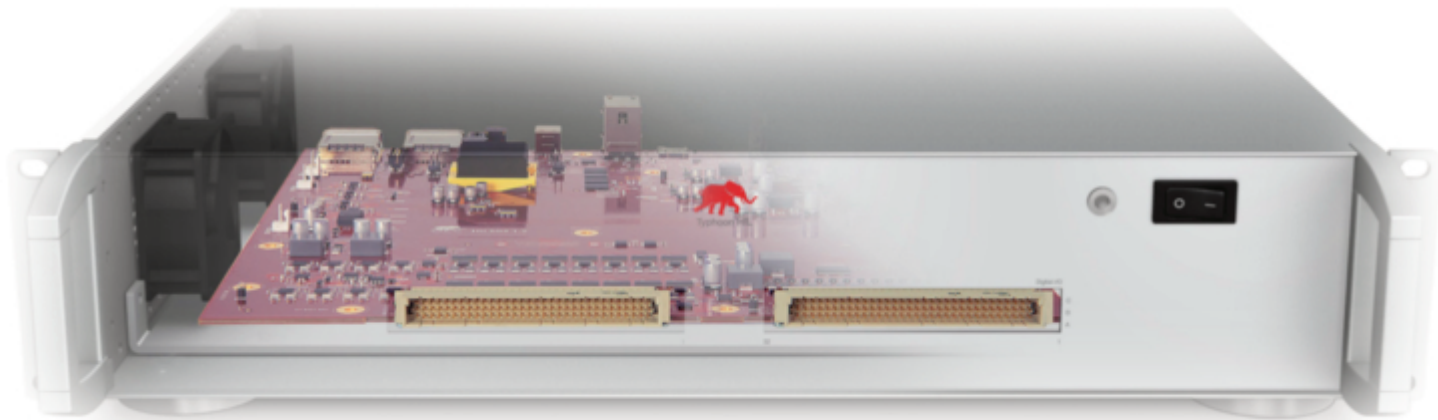
Рад уређаја енергетске електронике праћен је прелазним процесима чије се време смирења разликује и до девет редова величине. Трајање комутација полупроводничких прекидача мери се наносекундама, док се време синхронизације мрежних инвертора мери секундама. Симулација уређаја енергетске електронике је моћан алат у рукама пројектанта. Међутим, поменута динамика значајно отежава свеобухватну симулацију.

Могућност паралелног извршавања наизглед неограниченог броја алгоритама на FPGA логичким колима значајно олакшава посао и ствара могућност да се уређаји енергетске електронике симулирају на начин који даје резултате веома блиске резултатима експерименталних мерења. Концепт познат под именом *Hardware in the Loop* (HIL) ствара могућност да се енергетски претварачи представе одговарајућом електронском емуляцијом на систему FPGA кола и процесора. Примена HIL платформи је од великог значаја за инжењере који развијају алгоритме управљања енергетским претварачима које не могу обезбедити у лабораторији. Уместо реалних објеката управљања, развојни инжењери могу повезати прототип свог управљачког система и електронску емуляцију претварача начињену на HIL платформи, што значајно убрзава рад.

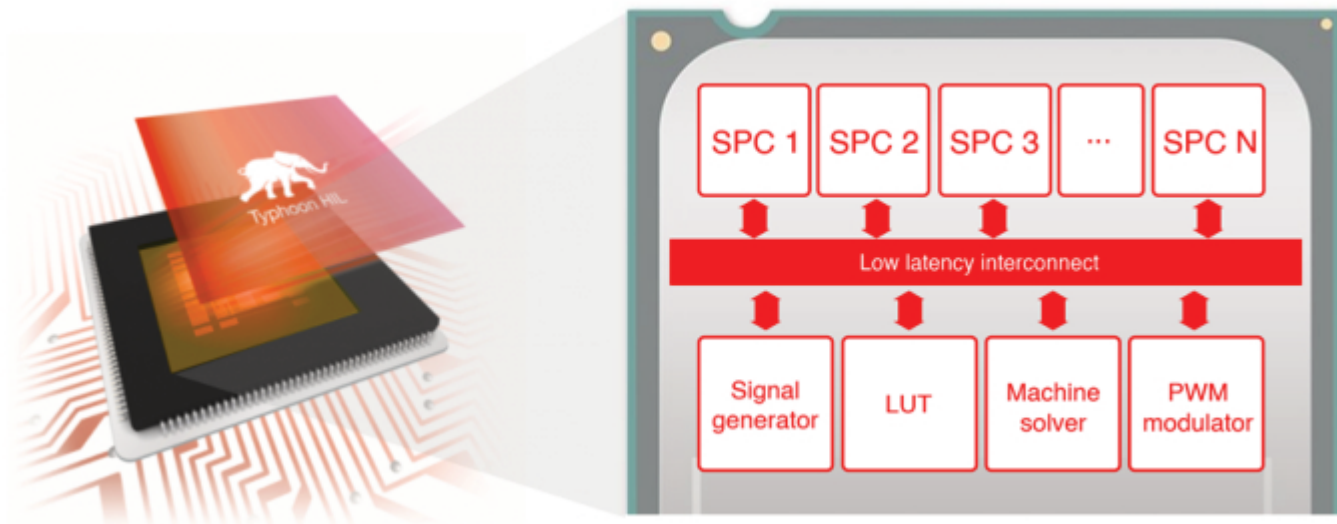


Турphoon HIL софтверски алати за дизајн и тестирање

Никола и Иван су оснивачи компаније Turhoon HIL, Inc, коју су основали са својим колегама др Душаном Мајсторовићем са Факултета техничких наука у Новом Саду и проф. Џоном Јоанополусом (John Joannopoulos) са МИТ-а 2008. године. Компанија је данас технолошки лидер у области система за тестирање базираних на HIL методологији. Ови системи су незаменљиви у развоју и тестирању управљачког софтвера свих претварача енергетске електронике, као и у дигитализацији заштите и управљања електроенергетских система. Компанија запошљава 70 врхунских стручњака на пет локација на три континента: у Новом Саду, Бостону, Цириху, Ванкуверу и Флорианополису. На путу од идеје до иновације, компанија је уживала несебичну подршку Факултета техничких наука (ФТН) у Новом Саду и катедре проф. Владимира Катића, као и Националног института и приватне компаније РТ-РК основане око проф. Владимира Ковачевића, такође са ФТН-а. Системи компаније Turhoon HIL се данас користе у преко 400 компанија и на више од 250 универзитета и истраживачких центара широм света.



Индустријски HIL симулатор у реалном времену Turhoon HIL602+



FPGA дигитални процесор за симулацију динамичких система у реалном времену



What's New (www.typhoon-hil.com)



Никола Челановић (Google Scholar)



Иван Челановић (Google Scholar)



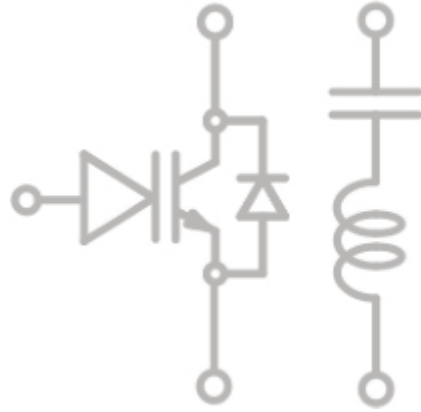
Презентација компаније Typhoon HIL



Typhoon HIL – видео прилог на PTC-у



Microgrid & DER Controller Symposium 2017

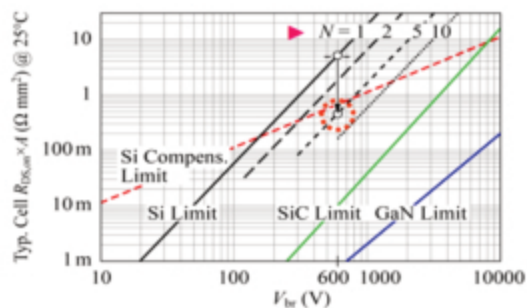


Развој вишећелијских енергетских претварача и претварача са парцијалним преносом снаге *Multi-Level, Multi-Cell & Partial Power Processing Converters*



Допринос професора Петра Ј. Грбовића (1971)
Универзитет LFU у Инзбруку

Приликом пројектовања уређаја енергетске електронике међу примарним циљевима је увећање специфичне снаге, што смањује масу и димензије уређаја, као и смањење губитака, што увећава ефикасност претварања енергије. Поред тога, потребно је искористити напредак полупроводничке технологије и пројектовати напредне алгоритме управљања са циљем да се смањи маса бакара, алуминијума и гвожђа неопходна за градњу претварача. Проф. Петар Грбовић је дао значајан допринос развоју нових топологија енергетских претварача који увећавају специфичну снагу и смањују губитке. Енергетски претварачи са више ћелија и нивоа (Interleaved Multi-Level & Multi-Cell Converters) остварују назначене циљеве путем паралелног и серијског повезивања са фазним померањем управљачких сигнала.

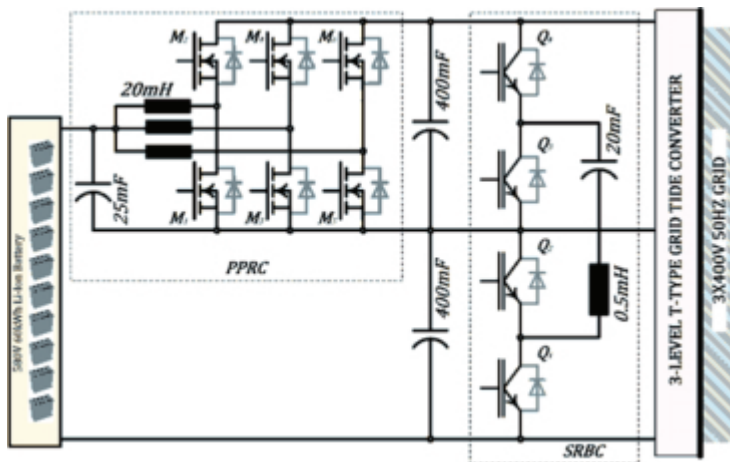


„Померање граница“ применом
вишећелијских претварача



Примена полупроводничких прекидача на супрот
примени алуминијума, бакара и гвожђа

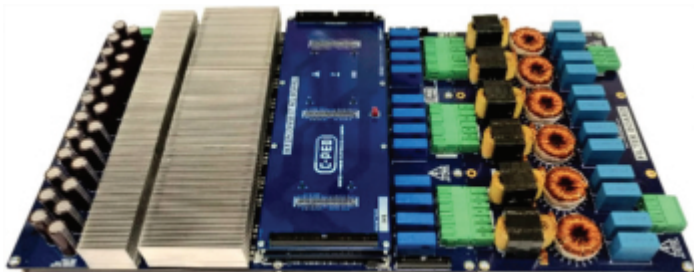
Специфична снага и ефикасност претварача може се постићи градњом претварача са парцијалним преносом снаге (Partial Power Processing Converters). У већини примена нема потребе за широким опсегом регулације излазних величина, тако да се топологија претварача може сачинити тако да већи део излазне снаге буде пренет са улаза на излаз без претварача, док се мањи део претвара и прилагођава како би се добио жељени излаз. Типични примери примене претварача са парцијалним преносом су пуњачи батерија, претварачи за обновљиве изворе енергије, напајања за сервере и рачунаре, исправљачи за регулисане погоне и други.



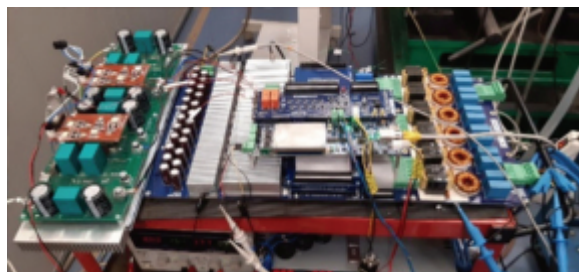
Претварач за повезивање батерије на нисконапонску енергетску мрежу. Снага 30 kVA, ефикасност >99,5%, густина снаге >50 kW/dm³ и специфична снага > 25 kW/kg



Претварач за повезивање соларних плоча. Снага 15 kW, ефикасност >99,5%, густина снаге >50 kW/dm³ и специфична снага > 25 kW/kg



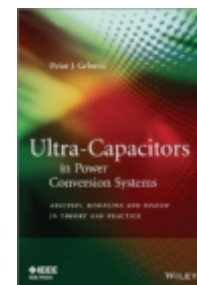
Двостепени претварач са 5 нивоа и 2 ћелије (5 Level 2 Cell T Type Back-to-back Converter). Снага 20 kVA, ефикасност >98,5%, густина снаге > 5,3 KVA/dm³, специфична снага >5 kVA/kg



Лабораторија за енергетску електронику на Универзитету у Инзбруку



Биографија и библиографија проф. Петра Грбовића



Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems: Applications, Analysis and Design from Theory to Practice (Wiley Online Library)

**Моделовање и управљање енергетским претварачима
за побољшану стабилност електроенергетских система**
*Modeling and control of power-electronics converters
for power system stability enhancement*



Допринос др Игора Цветковића (1977)
Center for Power Electronics Systems (CPES), Virginia Tech

Развој енергетске електронике је неопходан услов за прикључење већине обновљивих извора енергије на електричну мрежу. Уз раст удела потрошача који се на мрежу повезују преко електронски контролисаних претварача, електроенергетика се постепено трансформише у електронску енергетику. Електричне мреже 21. века имају суштински измењену динамику и сасвим другачије потребе у погледу управљања и заштите. Системи слични модерној електроенергетској мрежи су и савремени електронски системи за дистрибуцију електричне енергије изграђени за авионе, бродове, електрична возила, дата центре и домове. Ради усклађивања великог броја енергетских претварача и управљање системом неопходно је развити иновативне методе праћења динамичких интеракција, нове приступе моделовању и напредне концепте управљања претварачима у системима енергетске електронике.

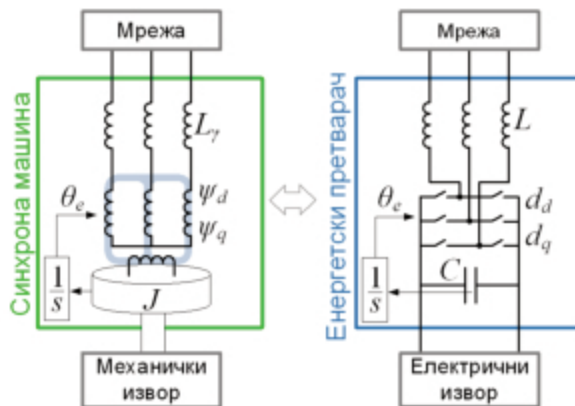
Игоров допринос пољу енергетске електронике огледа се у „black-box“ моделовању трофазних претварача које користи њихов одзив на серију пертурбација мале амплитуде и варијабилне учестаности. На бази предложеног приступа енергетски претварачи могу самостално дати оцену стабилности полазећи од сопствене динамике и измерених терминалних импеданси на својим прикључцима. Ова управљачка метода олакшава и имплементацију виртуалне инерције код мрежних претварача који замењују синхроне генераторе. Прелазак са традиционалне електричне мреже на мрежу 21. века и електронску енергетику праћено је заменом синхроних генератора мрежним инверторима, претварачима који енергију ветра и сунца претварају у енергију наизменичних струја мрежне учестаности. Метод Игора Цветковића омогућује да се мрежни претварачи, статички уређаји без обртних делова понашају по угледу на синхроне машине са ротором значајне инерције. Овај метод виртуалне инерције омогућује увећање удела обновљивих извора у систему без угрожавања стабилности, робусности и живавости система.



Генерализовани „black-box“ модел претварача са импедансама



Уређај за мерење импеданси у систему развијен у CPES-у 2014. године



Упростићени приказ електромеханичке дуалности



Прототип дигитално контролисаног претварача који емулира синхронну машину (и виртуалну инерцију)



Биографија Игора Цветковића



Библиографија Игора Цветковића

Средње напонска енергетска електроника велике снаге *Medium voltage high power electronics*

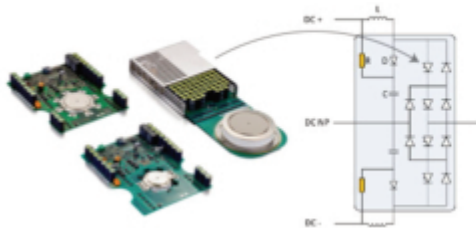


Допринос професора Дражена Дујића (1978)

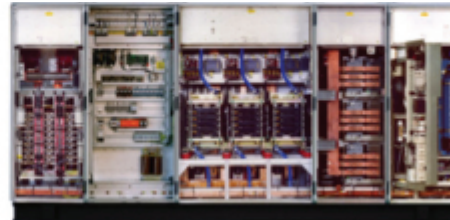
Швајцарски федерални институт за технологије (ЕПФЛ)

Енергетска електроника има изузетно важну улогу у трансформацији електричне енергије из једног облика у други. Решења претварача енергетске електронике, погодна за рад на средњем напону, су значајно другачија, како тополошки тако и детаљима дизајна, у односу на нисконапонску енергетску електронику. Слика доле показује типичан пример примена разних технологија енергетске електронике. Употребом одређеног полупроводника (IGCT) и селекцијом одређене топологије (NPC), могуће је реализовати основни прекидачки блок који је даље интегрисан као део комплетног претварача за дату примену, што је у приказаном случају ветроелектрана.

Полупроводник - ИГЦТ Топологија Реализација



Средњенапонски претварач



Ветроелектрана

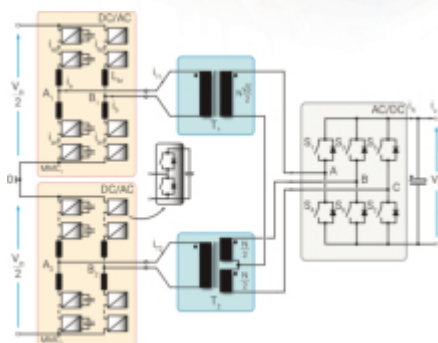


Типична употреба технологија у енергетској електроници од прекидача до апликације

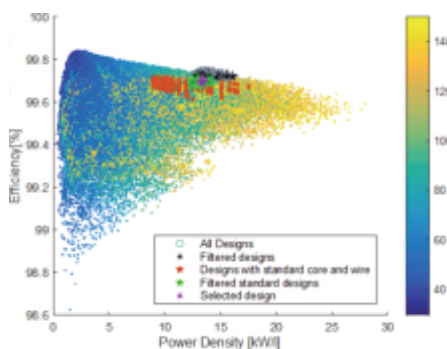
Главни доприноси проф. Дујића у области енергетске електронике су у области пројектовања и управљања претварача великих снага. Током својих докторских студија, под надзором проф. Емила Левија радио је на развоју прекидачких алгоритама управљања инверторима за напајање вишефазних машина. Током периода проведеног у индустрији (ABB) учествовао је у развоју 1,2 MW „електронског трансформатора“ за железницу који је као први на свету успешно примењен у Швајцарској железници. Од 2014, проф. Дујић и његови докторанти баве се средњенапонском електроником и дали су неколико нових претварачких топологија.



АББ: (лево) 1.2 MW „електронски трансформатор” за локомотиве; (десно) прва локомотива на свету са инсталираним електронским трансформатором.



Пример бидирекционалног изолованог dc/dc претварача



Резултати оптимизације дизајна 100 kW, 10 kHz трансформатора и реализован прототип



Биографија проф. Дражена Дујића



Power Electronics Laboratory (www.epfl.ch)



Проф. Дражен Дујић (Google Scholar)

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд

621.382(083.824)

001:929(497.11)(083.824)

ВУКОСАВИЋ, Слободан, 1962-

Српски научници у енергетској електроници / [аутор каталога Слободан Н. Вукосавић]. - Београд : Галерија науке и технике САНУ, 2020 (Београд : Colorgrafix). - 68 стр. : илустр. ; 22 x 24 cm. - (Галерија науке и технике САНУ ; бр. 43)

Податак о аутору преузет из колофона. - Тираж 500.

ISBN 978-86-7025-886-0

а) Енергетска електроника - Изложбени каталози б) Научници - Србија - Биографије

COBISS.SR-ID 27745033

