



**UNIVERZITET CRNE GORE**  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

BSc Miloš Jelovac

**ANALIZA EFEKATA ATMOSFERSKIH PRENAPONA NA**  
**PUNIONICE ZA ELEKTRIČNA VOZILA I DEFINISANJE**  
**OPTIMALNE PRENAPONSKE ZAŠTITE**

**MASTER RAD**

Podgorica, 2023. godina

## **PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU**

**Ime i prezime:** Miloš Jelovac

**Datum i mjesto rođenja:** 18.06.1997. godine, Pljevlja, Crna Gora

**Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:** Energetika i automatika, 2020. godina

## **INFORMACIJE O MASTER RADU**

**Naziv master studija:** Elektroenergetski sistemi

**Naslov rada:** Analiza efekata atmosferskih prenapona na punionice za električna vozila i definisanje optimalne prenaponske zaštite

Elektrotehnički fakultet UCG, Podgorica

## **OCJENA I ODBRANA MASTER RADA**

**Datum prijave master rada:** 01.04.2022. godine

**Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema:** 16.06.2022. godine

**Komisija za ocjenu/odbranu rada:**

1. Prof. dr Saša Mujović, ETF Podgorica, predsjednik,
2. Prof. dr Vladan Radulović, ETF Podgorica, mentor,
3. Prof. dr Zoran Miljanić, ETF Podgorica, član.

**Datum odbrane:** 24.10.2023.godine

**Datum promocije:**

Ime i prezime autora: Miloš Jelovac, BSc

## ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistrski rad pod naslovom:

**„Analiza efekata atmosferskih prenapona na punionice za električna vozila i definisanje optimalne prenaponske zaštite“**

moje originalno djelo.

**Podnosilac izjave,**

**Miloš Jelovac, BSc**



U Podgorici, dana 30.08.2023. godine

## **PREDGOVOR**

Osnovni cilj ovog rada jeste da ukaže na neophodnost adekvatne zaštite punionica za električne automobile usljed uticaja atmosferskih pražnjenja. Stoga je izložen detaljan simulacioni model atmosferskog pražnjenja, punionice za električne automobile i analiza dobijenih rezultata.

Želim iskoristiti ovu priliku da se zahvalim mentoru – prof. dr Vladanu Raduloviću na neizmjerne podršci, stručnim savjetima i inspiraciji tokom izrade master teze. Posebno želim da istaknem Vašu posvećenost i strpljenje u radu sa studentima, saradnja sa Vama je privilegija.

Posebnu zahvalnost iskazujem svojim roditeljima i porodici na neizmjernom povjerenju, motivaciji i svakodnevnoj podršci.

## SAŽETAK

Punionice za električne automobile su izložene svim efektima čiji je uzrok u distributivnoj mreži, a koji mogu da izazovu poremećaje, kvarove, oštećenja komponenti koje sačinjavaju punionice za električne automobile i/ili baterije električnih automobila. S obzirom da su atmosferski prenaponi jedno od najopasnijih stanja koja se pojavljuju u NN mreži, neophodno je analizirati njihov uticaj na punionice za električne automobile.

U radu je sprovedena sveobuhvatna analiza uticaja atmosferskih prenapona koji putem distributivne mreže nailaze na punionice za električna vozila. Modelovanje atmosferskih prenapona u niskonaponskoj mreži izvršeno je prema IEEE C.62.41.1 standardu. Atmosfersko pražnjenje je modelovano kao kombinovani talas u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK. U istom softverskom paketu je modelovana i punionica za električne automobile i to na osnovu tri cjeline: diodni mostni ispravljač; automatski ispravljač faktora snage; fazno pomjerajući mostni konvertor. Simulacioni model kombinovanog talasa je priključen na ulaz punionice za električne automobile, a trenutak okidanja prekidača kombinovanog talasa je podešen sa vremenskim zatezanjem od 5ms u cilju dobijanja što jasnijih rezultata. Dobijeni rezultati upućuju na niz nepravilnosti koje se javljaju unutar punionice za električne automobile. Jednovremeno provođenje sve četiri diode diodnog mostnog ispravljača, izuzetno visoke vrijednosti amplituda naponskih i strujnih talasa unutar komponenti punionice za električne automobile. Postoji opasnost od pojave proboja/preskoka izolacije dioda diodnog mostnog ispravljača ali i kalema koji se nalazi u sastavu APFC-a (automatskog ispravljača faktora snage) ali i oštećenja dioda diodnog mostnog ispravljača ili kondenzatora koji ulazi u sastav APFC-a.

Analizom dobijenih rezultata zaključuje se da su punionice za električne automobile podložne negativnom uticaju atmosferskog pražnjenja u NN mreži. Neophodna je adekvatna zaštita punionica za električne automobile, kako bi se izbjegao nepravilan rad ili čak trajno oštećenje punionica, a tim bi se izbjegla i povećana finansijska ulaganja. Pravilnim modelovanjem odvodnika prenapona na ulazu punionice gdje se simulira pojava kombinovanog talasa smanjuje amplitude naponskih i strujnih talasnih oblika na prihvatljive vrijednosti i potpuno štiti punionicu za električne automobile od negativnog uticaja.

**Ključne riječi:** Punionice-za-električna-vozila, Atmosfersko-pražnjenje, Kombinovani-talasa, Automatski-ispravljač-faktora-snage, Diodni-mostni-ispravljač, Fazno-pomjerajući-mostni-konvertor.

## ABSTRACT

Charging stations for electric vehicles are susceptible to all effects originating from the distribution network, which can lead to disruptions, failures, and damage to the components comprising electric vehicle charging stations and/or electric vehicle batteries. Given that atmospheric overvoltages are among the most dangerous conditions in the low-voltage network, it is essential to analyze their impact on electric vehicle charging stations.

A comprehensive analysis has been conducted on the impact of atmospheric overvoltages that propagate through the distribution network and encounter electric vehicle charging stations. Modeling of atmospheric overvoltages in a low-voltage network has been done following the IEEE C.62.41. standard. Atmospheric discharge was modeled as a combined wave in the MATLAB/SIMULINK software package. In the same software package, an electric vehicle charging station was also modeled based on three units: a diode bridge rectifier, an automatic power factor corrector, and a phase-shifted full bridge converter. The simulation model of the combined wave is connected to the input of the electric vehicle charging station, and the moment of triggering the combined wave switch is set with a time delay of 5ms to obtain clearer results. The obtained results indicate a series of irregularities occurring within the electric vehicle charging station. Simultaneous conduction of all four diodes in the diode bridge rectifier results in extremely high amplitude values of voltage and current waves within the components of the electric vehicle charging station. This could lead to insulation breakdown or voltage spikes not only in the diodes of the bridge rectifier but also in the inductor that is part of the APFC (Automatic Power Factor Corrector) assembly. As well as potential damage to the diodes of the diode bridge rectifier, there's a risk of damaging the capacitor within the APFC assembly.

Through the analysis of the obtained results, it is concluded that electric vehicle charging stations are susceptible to the negative impact of atmospheric discharges in the low-voltage network. Adequate protection measures for electric vehicle charging stations are necessary to prevent improper functioning or even permanent damage, thereby avoiding increased financial investments. By accurately modeling the surge arrester at the charging station input and simulating the occurrence of the combined wave, the amplitudes of voltage and current waveforms are reduced to acceptable levels, effectively safeguarding the electric vehicle charging station from negative influences.

**Keywords:** Electric-vehicle-charging-stations, Atmospheric-discharge, Combined-wave, Automatic-power-factor-corrector, Diode-bridge-rectifier, Phase-shifted-full-bridge-converter.

# SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	ATMOSFERSKI PRENAPONI U ELEKTRIČNIM MREŽAMA .....	3
2.1.	Prenaponi pri atmosferskom pražnjenju.....	3
2.1.1.	Karakteristike prenapona – SCENARIO I .....	5
2.1.1.1.	Korelacija između amplitude prenapona i frekvencije pojave.....	6
2.1.1.2.	Ukupno trajanje prenapona.....	7
2.1.1.3.	Frekvencija oscilovanja .....	8
2.1.1.4.	Brzina porasta prenaponskog talasa.....	8
2.1.2.	Karakteristike prenapona – SCENARIO II.....	9
3.	MODELOVANJE ATMOSFERSKOG PRAŽNJENJA U ELEKTRIČNIM INSTALACIJAMA NISKO NAPONA .....	13
3.1.	Model direktnog udara atmosferskog pražnjenja - Scenario II.....	14
3.2.	Model atmosferskog pražnjenja - Scenario I.....	15
3.2.1.	Standardni talasni oblici .....	15
3.2.1.1.	100kHz Oscilatorni talas („100kHz Ring Wave“). .....	15
3.2.1.2.	Kombinovani talas („Combination Wave“). .....	18
3.2.1.3.	Naponski 1.2/50 $\mu$ s talas i strujni 8/20 $\mu$ s talas.....	22
4.	MODELOVANJE PUNIONICE ZA ELEKTRIČNE AUTOMOBILE .....	24
4.1.	Diodni mostni ispravljač .....	25
4.2.	APFC – automatski ispravljač faktora snage .....	27
4.2.1.	Modelovanje (dizajn) APFC boost konvertora .....	31
4.2.1.1.	Modelovanje induktivnosti L.....	31
4.2.1.2.	Modelovanje izlazne kapacitivnosti C.....	32
4.2.2.	Modelovanje APFC kontrolera .....	32
4.3.	PSFB – fazno pomjerajući mostni konvertor .....	33
4.3.1.	Modelovanje fazno pomjerajućeg mostnog konvertora – PSFB.....	34
4.3.1.1.	Invertor.....	35
4.3.1.2.	Linearni transformator .....	35
4.3.1.3.	Ispravljač.....	35

4.3.1.4.	Izlazni filter.....	35
4.3.1.4.1.	Modelovanje induktivnosti $L2$ .....	36
4.3.1.4.2.	Modelovanje kapacitivnosti $C2$ .....	37
4.3.2.	Modelovanje kontrolne petlje PSFB-a.....	38
5.	SIMULACIJA UTICAJA ATMOSFERSKIH PRENAPONA NA PUNIONICE ZA ELEKTRIČNA VOZILA.....	40
5.1.1.	Istovremeno provođenje dioda diodnog mostnog ispravljača.....	41
5.1.2.	Izuzetno visoke vrijednosti intenziteta struje kroz elemente punionice.....	45
5.1.3.	Izuzetno visoke vrijednosti amplitude napona na elementima punionice.....	50
5.1.3.1.	Simulacija proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3.....	51
5.1.3.2.	Simulacija proboja/preskoka izolacije na kalemu APFC-a.....	57
5.1.3.2.1.	Prekid rada kapacitivnog elementa (kondenzatora).....	63
5.1.3.2.1.1.	Strujni talasni oblici.....	63
5.1.3.2.1.2.	Naponski talasni oblik.....	73
5.2.	Odvodnik prenapona.....	80
6.	ZAKLJUČAK.....	84



## 1. UVOD

U proteklih nekoliko godina uočava se značajan porast popularnosti električnih vozila. Tokom vremena tehnologija je napredovala, cijena degradirala, a podrška i podsticaj čistim, odnosno zelenim vidovima transporta nikada nije bila intenzivnija. Za ubrzan razvoj ovih tehnologija potrebno je bilo da se razvije svijest ljudi, ali i napredak u proizvodnji baterijskih sistema, razvoj dovoljnog broja i kvaliteta odgovorajućih punionica za električne automobile, kao i razvoj adekvatne infrastrukture koja je spremna da prihvati ovu tehnologiju. Pod infrastrukturom se podrazumjeva kako građevinska infrastruktura, prilazi i adekvatna parking mjesta, tako i energetska infrastruktura i mogućnost prihvatanja velikog broja punionica za električne automobile, a da se pritom stabilnost i rad elektroenergetskog sistema sa akcentom na elektrodistributivni sistem ne ugroze [1].

Baterijski sistemi litijum-jonskih baterija su u poslednjih deset godina doživjeli ogroman napredak. Njihova cijena je u tom periodu pala za više od 80%. U tom istom periodu je energija koja se dobija iz litijum-jonske baterije udvostručila svoju vrijednost i to dostižući 240Wh/kg, što je rezultiralo manjom masom baterija i lakšom integracijom, kako u električne automobile, tako i u sve ostale uređaje i prevozna sredstva. Ovaj fenomen naglog razvoja i proizvodnje baterijskih sistema za skladištenje električne energije je značajno potpomogao evoluciju i ekspanziju elektromobilnosti [1,2].

Osim dovoljnog broja punionica za električne automobile, važan je i njihov optimalan raspored i lokacija, kako infrastruktura punionica ne bi bila problem i prepreka razvoju elektromobilnosti. Istraživanja su pokazala da je krajem 2019. godine broj punionica za električne automobile iznosio nešto više od sedam miliona, od čega je gotovo milion javnih punionica za električne automobile. U narednim godinama trendovi broja punionica za električne automobile su u konstantnom porastu što je sa jedne strane pozitivan primjer razvoja i adaptacije elektromobilnosti. Sa druge strane, sve punionice za električne automobile su priključene na elektrodistributivnu mrežu, a samim tim i podložne svim uticajima i štetnim efektima čiji je uzrok u elektrodistributivnoj mreži, a mogu da izazovu poremećaje i kvarove u elementima punionica i/ili u električnom sistemu vozila [1].

S obzirom da su atmosferski prenaponi jedno od najopasnijih stanja koje se pojavljuje u distributivnoj mreži, neophodno je analizirati njihov uticaj na punionice za električne automobile. Atmosferski prenaponi se u distributivnoj mreži mogu pojaviti kao posledica direktnog atmosferskog pražnjenja u elemente mreže ili pražnjenja u zemlju u neposrednoj blizini elemenata, kada se u mreži pojavljuju indukovani prenaponi [3].

U ovom radu analiziran je uticaj atmosferskih prenapona koji se pojavljuju u elektrodistributivnoj mreži na punionice za električna vozila, kako bi se sagledali svi efekti i posledice koje se mogu pojaviti.

Atmosferski prenaponi su modelovani reprezentativnim kombinovanim talasom  $1.2/50\mu s$  –  $8/20\mu s$  prema IEEE C.62.41.1 standardu [3].

Mjerenja su sprovedena prevashodno na samom ulazu punionice za električna vozila, kao i na izlazu iz iste. Pored pomenutih tačaka mjerenja naponskih i strujnih prilika, izvršena su mjerenja na svim elementima punionice koji su od interesa, kao i onim mjestima gdje se očekuje proboj/preskok izolacije i moguće „vruće“ tačke koje bi bile mjesto problema u radu i normalnom funkcionisanju punionice za električne automobile.

Na osnovu dobijenih rezultata za sve analizirane slučajeve, analizirani su efekti i opasnosti koje su uzrokovane atmosferskim pražnjenjem i uticajem u niskonaponskoj (NN) mreži. U cilju zaštite sistema punionica za električna vozila i samih električnih vozila identifikovanih opasnosti predložen je set mjera prenaponske zaštite i njene optimalne realizacije.

Rad se sastoji od VI poglavlja. U prvom poglavlju date su uvodne napomene o radu i obrađivanoj temi. U drugom poglavlju su opisani atmosferski prenaponi u električnim mrežama. Opisane su karakteristike prenapona i to korelacija između amplitude prenapona i frekvencije pojave, ukupno trajanje, frekvencija oscilovanja i brzina porasta prenaponskog talasa. U trećem poglavlju je dato modelovanje atmosferskog pražnjenja u električnim instalacijama niskog napona. Opisani su prenaponski talasni oblici koji pripadaju standardnim talasnim oblicima od kojih je kombinovani prenaponski talas korišćen za simulacije i ispitivanje uticaja na punionice za električne automobile. U četvrtom poglavlju je modelovana punionica za električne automobile u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK. Punionica za električne automobile je modelovana iz tri cjeline. Prvo je modelovan diodni mostni ispravljač, nakon čega je modelovan APFC odnosno automatski ispravljač faktora snage i na kraju je modelovan PSFB ili fazno pomjerajući mostni konvertor. U petom poglavlju su prikazani rezultati mjerenja koji su dobijeni za strujne i naponske talasne oblike u svim djelovima punionice za električne automobile. Prikazani su i rezultati mjerenja u slučaju proboja/preskoka izolacije na pojedinim elementima punionice ili čak pregorijevanja i prekida rada pojedinih elemenata. Nakon analize rezultata dat je i predlog zaštite punionice za električne automobile od neželjenih dejstava i pojave opasnih stanja. Na kraju rada dati su odgovarajući zaključci i spisak korišćene literature.

## **2. ATMOSFERSKI PRENAPONI U ELEKTRIČNIM MREŽAMA**

Prenapon predstavlja napon između faznog provodnika i zemlje ili između faza čija tjemena vrijednost prevazilazi tjemenu vrijednost najvišeg napona opreme [4].

Pojava prenapona je čest uzrok oštećenja izolacije opreme na svim naponskim nivoima unutar elektroenergetskog sistema. Ovakva dešavanja mogu da dovedu do oštećenja opreme, uređaja ali i do prekida snadbijevanja potrošača električnom energijom [4].

Prema uzroku nastanka prenapone u niskonaponskoj mreži dijelimo u dvije kategorije:

- spoljašnji ili atmosferski prenaponi
- unutrašnji prenaponi

Osim pomenuta dva, treći fenomen koji treba uzeti u obzir je pojava prenapona kao uzrok međusobne interakcije dva odvojena sistema. Primjer dva odvojena sistema bi mogao da bude instalacija niskog napona i komunikaciona instalacija, za vrijeme pojave prenaponskog i/ili strujnog talasa u jednom od posmatranih sistema [4].

Spoljašnji ili atmosferski prenapon je od izuzetnog značaja za analizu i ispitivanje uticaja na punionice za električne automobile. Iz tog razloga u ovom radu će se akcenat staviti upravo na ovaj uzrok nastanka prenapona u niskonaponskoj mreži i njihov uticaj na punionice za električne automobile.

Unutrašnji prenaponi nastaju kao posledica poremećaja u samom sistemu. Nastaju usljed naglih promjena konfiguracije postrojenja i mreža. Kod promjene režima rada se javljaju ovakvi prenaponi, a to je moguće tokom normalnih/uobičajenih ili havarijskih manipulacija. Dije se prema uzroku trajanja na komutacione i privremene [3].

### **2.1. Prenaponi pri atmosferskom pražnjenju**

Spoljašnji odnosno atmosferski prenaponi nastaju usljed pražnjenja nagomilanog elektriciteta u oblacima direktno u elemente elektroenergetskog sistema (prenapon direktnog pražnjenja) ili u njihovu neposrednu blizinu (indukovani prenapon).

Kada nastupi direktno atmosfersko pražnjenje, tada struje (reda stotina kA) izazivaju izuzetno visoke vrijednosti napona na elementima elektroenergetskog sistema (reda nekoliko hiljada kV) što u najvećem broju slučajeva uzrokuje proboj izolacije i oštećenje opreme. U pojednostavljenim analizama atmosfersko pražnjenje pri direktnom udaru se modeluje idealnim

strujnim izvorom jer je impedansa kanala atmosferskog pražnjenja izuzetno velika, reda hiljada oma [3,4].

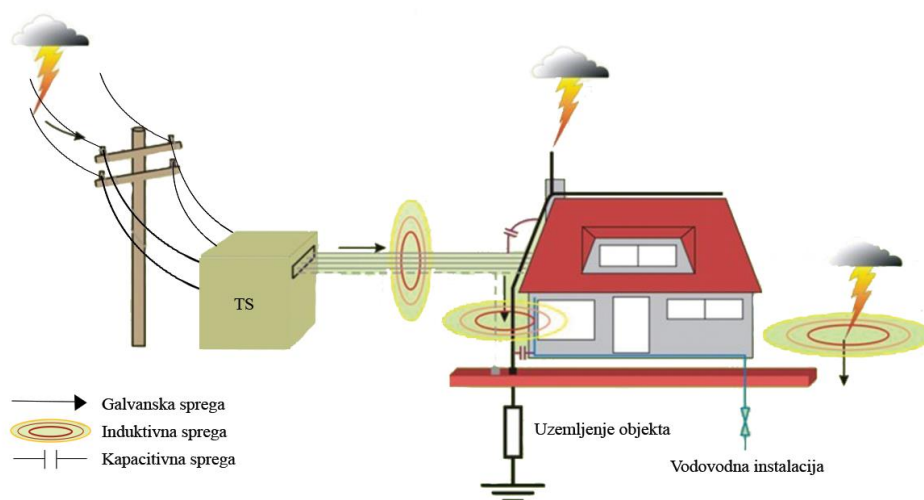
U slučaju atmosferskih pražnjenja u blizini elektroenergetskog objekta dolazi do indukovanih prenapona koji dostižu vrijednosti do nekoliko stotina kV, koji su opasni za mreže srednjeg i niskog napona.

Oblik i maksimalne vrijednosti atmosferskih prenapona imaju zavisnost od energije atmosferskog pražnjenja. Nezavisno o kom naponskom nivou elektroenergetskog sistema je riječ, može se desiti da se iste vrijednosti atmosferskog prenapona prostiru na različitim naponskim nivoima elektroenergetskog sistema. Po pravilu su atmosferski prenaponi na mjestu nastanka/pražnjenja aperiodični, a mogu izazvati dodatne oscilacije [5].

Pri direktnom udaru atmosferskog pražnjenja kao i u slučaju udara atmosferskog pražnjenja u zemlju u relativnoj blizini posmatranog objekta dolazi do pojave prenaponskih i/ili strujnih talasa u instalacijama posmatranog objekta preko nekih od ili preko svih sledećih vrsta sprega[3,4]:

- Galvanske sprege – usljed proticanja struje atmosferskog pražnjenja dolazi do pojave prenaponskih talasa usljed povećanja potencijala uzemljivačkog sistema objekta ili usljed prodora atmosferskog pražnjenja putem električnog priključka.
- Induktivne sprege – usljed proticanja struje atmosferskog pražnjenja kroz provodne puteve prema referentnoj zemlji, dolazi do pojave elektromagnetnog polja kroz posmatrani objekat, i koje indukuje prenaponske talase u instalacijama objekta.
- Kapacitivne sprege – usljed pojave razlike potencijala između provodnih elemenata pojedinih instalacija objekta može doći do proboja ili preskoka između pojedinih instalacija.

Pojava prenaponskih i/ili strujnih talasa preko tri navedene sprege je grafički prikazana na slici 2.1.



*Slika 2.1 Mehanizam nastanka prenaponskog talasa*

Visina prenapona pri atmosferskom pražnjenju je uslovljena energijom atmosferskog pražnjenja. Prema IEEE Std. C62.41.1[3], prenaponski talasi pri atmosferskom pražnjenju se mogu opisati kroz dva različita scenarija:

- Scenario I – scenario koji obuhvata pojavu prenaponskih talasa u električnoj instalaciji u slučaju direktnog udara atmosferskog pražnjenja u susjedne objekte.
- Scenario II – direktni udar atmosferskog pražnjenja u prihvatni sistem spoljašnje gromobranske instalacije posmatrane strukture/objekta ili u zemlju u relativnoj blizini posmatranog objekta.

U nastavku su opisane osnovne karakteristike prenaponskih i strujnih talasa koji pripadaju pojedinim scenarijima.

### 2.1.1. Karakteristike prenapona – SCENARIO I

Mjerenja pokazuju da prenaponski talasi u električnim instalacijama niskog napona koji prodiru u instalaciju kroz električni priključak nailaze na veoma mala prigušenja [6,7]. Trajanje čela talasa za tipične dužine provodnika u električnim instalacijama niskog napona (dužine < 200m) je duže od vremena prostiranja talasa duž provodnika. Iz tog razloga efekat refleksije talasa ne utiče na amplitudu prenapona, usljed čega se može smatrati da prenaponski talasi sa amplitudom ispod vrijednosti probojnog napona provodnika i bez postojanja otočnih impedansi male vrijednosti u električnoj instalaciji, se prostiru bez prigušenja[3]. U poređenju sa prenaponskim talasima, strujni talasi se tokom prostiranja kroz električnu instalaciju prigušuju, to je posledica

smanjenja amplitude usljed dijeljenja struje na veliki broj dostupnih puteva kroz električnu instalaciju.

Rezultati priklupljeni mjerenjem, prijavljenim električnim incidentima, analizom kvarova mogu se klasifikovati u više kategorija prenapona koji po uzroku nastanka pripadaju SCENARIJU I[3].

- Korelacija između amplitude prenapona i frekvencije pojave
- Ukupno trajanje prenapona
- Frekvencija oscilovanja
- Brzina porasta prenaponskog talasa

#### 2.1.1.1. Korelacija između amplitude prenapona i frekvencije pojave

Upotreba uređaja za zaštitu od prenapona (UZP) u električnim instalacijama niskog napona krajem prošlog vijeka, pokazala je da samo mjerenje nivoa prenapona nije dovoljan pokazatelj ugroženosti opreme u instalacijama. Osim toga, sve veća primjena uređaja energetskih pretvarača uslovlila je povećanje ukupne kapacitivnosti električne instalacije, čime je dodatno uslovljeno smanjenje nivoa prenapona usljed smanjenja strmine prenaponskog talasa [3,4].

Frekvencija pojave prenapona i vrijednosti amplituda zavise od vrste električne instalacije i od lokacije gdje su izvršena mjerenja. Najveće vrijednost amplituda prenaponskih talasa se događaju na nadzemnim vodovima električnih instalacija niskog napona, dok su u instalacijama unutar objekta amplitude prenaponskih talasa ograničene probojem izolacije [8,9] ili karakteristikama prostiranja prenapona [10].

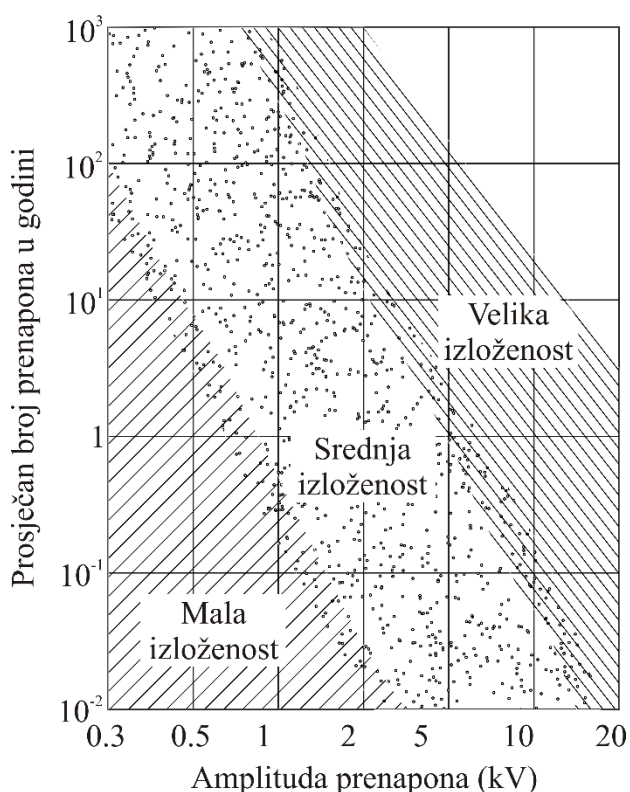
U dostupnoj literaturi postoji više različitih krivih kojim se prikazuje zavisnost amplitude prenaponskih talasa i frekvencije njihovog pojavljivanja. Zajednička karakteristika jeste što se sa povećanjem amplitude prenaponskog talasa smanjuje frekvencija pojave. Ovakve krive omogućavaju sprovođenje analize ugroženosti opreme kao i utvrđivanje kriterijuma i dozvoljenog nivoa opterećenja opreme. Na osnovu korelacije između amplitude prenaponskog talasa i frekvencije pojave uveden je pojam „izloženosti“ opreme koji integriše karakteristike električne instalacije objekta i sa aspekta amplitude prenaponskog talasa i sa aspekta frekvencije njihove pojave [3].

Stepeni izloženosti su sledeći [3]:

- Mala izloženost – električne instalacije u geografskim sredinama sa malim kerauničkim nivoom i relativno malim amplitudama prenapona.

- Srednja izloženost – električne instalacije u geografskim sredinama sa relativno visokim kerauničkim nivoom i amplitudama prenapona.
- Velika izloženost – električne instalacije u geografskim sredinama sa izuzetno visokim kerauničkim nivoom i amplitudama prenapona.

Koncept izloženosti opreme i korelacije između amplitude prenapona i frekvencije pojave se može vidjeti na slici 2.2. Ovdje treba uzeti u obzir da grafik predstavlja mjerenja bez upotrebe zaštitnih uređaja (UZP) i bez masovne upotrebe energetskih pretvarača u električnim instalacijama niskog napona.



Slika 2.2 Koncept izloženosti električne instalacije u Scenariju I [3]

Sa slike 2.2 se vidi da između pojedinih stepena izloženosti nisu date granične linije, data je postepena tranzicija između stepena izloženosti, što ukazuje da se dati podaci mogu koristiti isključivo kao indikatori stanja sa aspekta prenaponskog okruženja definisane električne instalacije, a nikako za kvalitativno pridruživanje pojedinim stepenima izloženosti [3].

#### 2.1.1.2. Ukupno trajanje prenapona

U zavisnosti od sprovedenih mjerenja trajanje prenaponskih talasa za jednosmjerni prenaponski talas traje od dijela mikrosekunde [11] pa do nekoliko milisekundi [12]. Oscilatorni prenaponski talasi imaju trajanje od jedne do deset perioda oscilatorne frekvencije.

### 2.1.1.3. Frekvencija oscilovanja

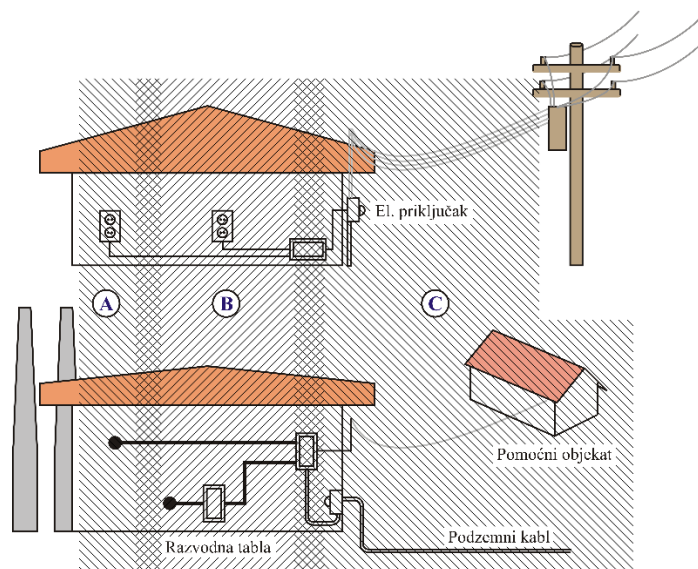
Frekvencija oscilovanja prenaponskih talasa se kreće od nekoliko kHz pa do 1MHz. Veće frekvencije su svojstvene prenaponskim talasima u uslovima bliskim rezonansi ili u slučaju prelamanja talasa i višestrukog odbijanja u električnim instalacijama manje dužine [13].

### 2.1.1.4. Brzina porasta prenaponskog talasa

Prema postojećim rezultatima mjerenja postoje veoma oskudni podaci kada je brzina porasta prenaponskog talasa u pitanju. Na osnovu dobijenih podataka najveća brzina porasta prenaponskog talasa je nešto veća od 100 V/ns, čak i za male vrijednosti amplitude prenaponskog talasa [3].

Za kvalitativni opis prenaponskih i strujnih talasa SCENARIJA I, IEEE Std. C62.41.1 [3] uvodi koncept kategorije lokacije. Standard definiše tri kategorije lokacije: A,B,C.

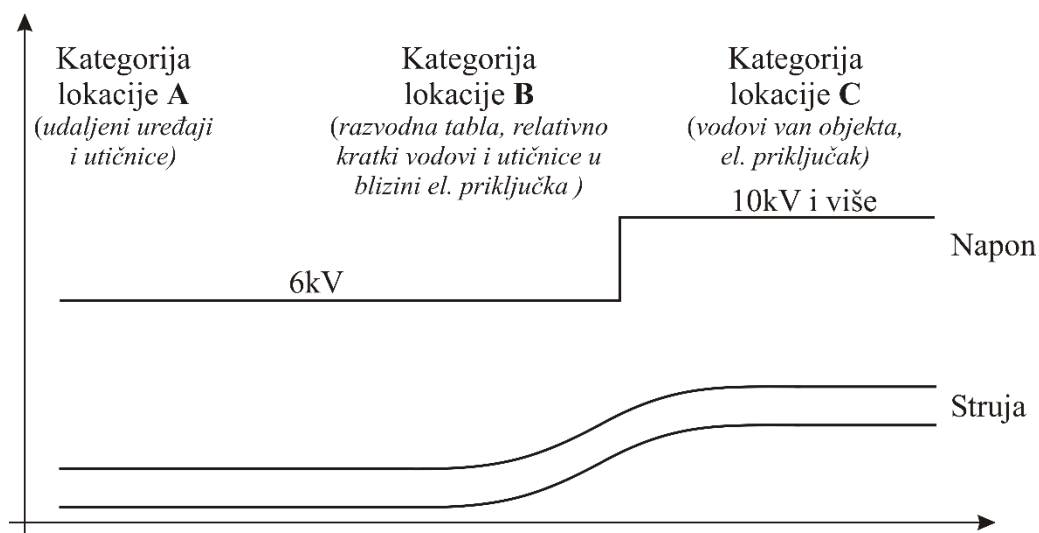
Kategorija lokacija A obuhvata dijelove električne instalacije (električne priključnice, uređaje) udaljene od električnog priključka instalacije. Kategorija lokacije C obuhvata dijelove provodnika električnog napajanja van objekta sa posmatranom električnom instalacijom, priključak električne instalacije i prateći dio instalacije unutar objekta. Kategorija lokacije B se nalazi između kategorija lokacije A i C. Grafički prikaz podjele objekta na kategorije lokacije se može vidjeti na slici 2.3.



*Slika 2.3 Principijelna podjela na kategorije lokacije*

„Koncept kategorija lokacija se oslanja na karakteristike koje se odnose na prostiranje prenaponskih talasa i raspodjelu struja u električnim instalacijama niskog napona. Iz tog razloga, koncept kategorija lokacija se može predstaviti i u obliku promjene nivoa napona i struja kao na slici 2.4.“ [3].





Slika 2.4 Nivoi promjene napona i struja zavisno od kategorije lokacije

Sa slike 2.4 se jasno može vidjeti da između pojedinih kategorija lokacije nema jasno navedenih granica, razlog je u tome što fenomen prostiranja prenaponskih i strujnih talasa ne poznaje striktno postavljene granice, već zavisi od fizičkih karakteristika elemenata. Umjesto strogo postavljenih granica koncept kategorije lokacije poznaje tranzicije, odnosno djelimična preklapanja koja povezuju određene kategorije lokacije. Nije realno očekivati naglu promjenu elektromagnetnih svojstava na pojedinom dijelu električne instalacije [3,14].

IEEE Std. C62.41.1[3] i IEEE Std. C62.41.2 [14] ne daju nikakve smjernice za primjenu UZP-ova u određenim kategorijama lokacije. Ovi IEEE standardni definišu standarde i daju dodatne testne naponske i strujne talase za testiranje opreme u određenim kategorijama lokacije i po potrebi ugradnju UZP-ova za zaštitu opreme.

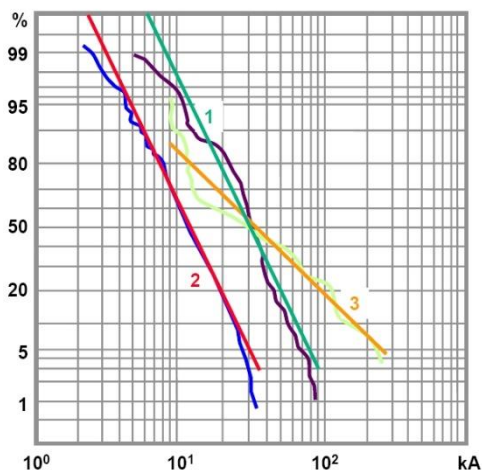
### 2.1.2. Karakteristike prenapona – SCENARIO II

U slučaju direktnog atmosferskog pražnjenja u prihvatni sistem spoljašnje gromobranske instalacije posmatranog objekta dolazi do raspodjele struja ka lokalnoj referentnoj zemlji i putevima prema udaljenoj referentnoj zemlji. Raspodjela struja ka lokalnoj referentnoj zemlji se ne sprovodi samo spušnim provodnicima spoljašnje gromobranske instalacije već i drugim tipovima instalacija kao što su vodovodne cijevi, instalacije za protok gasa, čelične konstrukcije objekta... Putevi kojima se struja raspodjeljuje ka udaljenoj referentnoj zemlji su provodnici koji služe za napajanje električnih instalacija samog objekta.

Dostupni podaci mjerenja struje atmosferskog pražnjenja koja se raspodjeljuje odvodnim kanalima ka lokalnoj referentnoj zemlji su rijetki i nema dovoljno publikacija, međutim postoje određeni podaci publikovani u [15,16] koji se odnose na ukupnu struju atmosferskog pražnjenja,

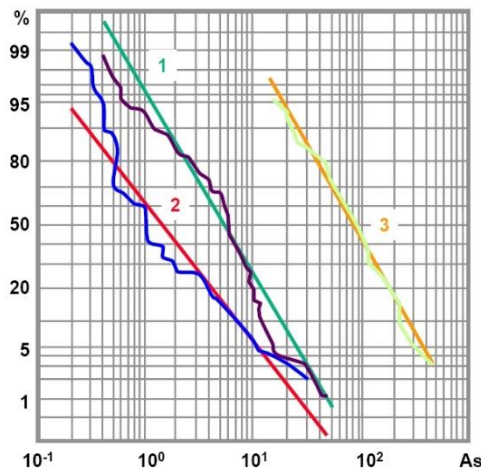
a predstavljeni su na slikama 2.5, 2.6, 2.7 (koriste se za definisanje parametara atmosferskog pražnjenja)[17].

Slika 2.5 prikazuje u logaritamsko-normalnoj razmjeri raspodjelu amplitude struje atmosferskog pražnjenja za negativno prvo pražnjenje (kriva sa oznakom 1), negativna uzastopna pražnjenja (kriva sa oznakom 2) i pozitivno prvo pražnjenje (kriva sa oznakom 3). Na apscisi je data amplituda struje u logaritamskoj razmjeri, dok je na ordinati data vjerovatnoća pojave struje veće amplitude. Interpolacija mjerenih rezultata je prikazana pravom linijom.



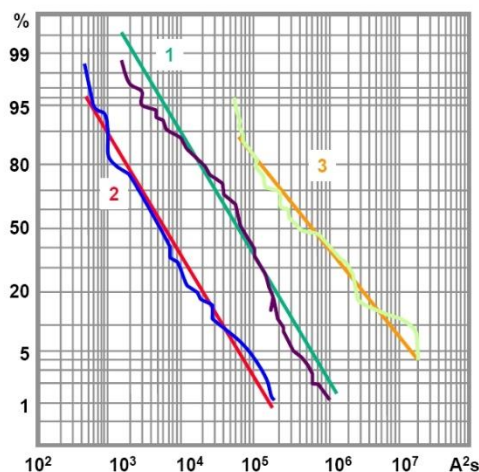
*Slika 2.5 Raspodjela amplitude struje atmosferskog pražnjenja 1. negativno prvo pražnjenje, 2. negativna uzastopna pražnjenja, 3. pozitivno prvo pražnjenje*

Slika 2.6. prikazuje u logaritamsko—normalnoj razmjeri raspodjelu količine naelektrisanja atmosferskog pražnjenja ( $Q = \int i \cdot dt$ ) za negativno prvo pražnjenje (kriva sa oznakom 1), negativna uzastopna pražnjenja (kriva sa oznakom 2) i pozitivno prvo pražnjenje (kriva sa oznakom 3). Na apscisi je data količina naelektrisanja u logaritamskoj razmjeri, a na ordinati vjerovatnoća pojave veće količine naelektrisanja. Prave linije predstavljaju interpolaciju mjerenih rezultata.



Slika 2.6 Raspodjela udarne količine naelektrisanja atmosferskog pražnjenja  
 1. negativno prvo pražnjenje, 2. negativna uzastopna pražnjenja, 3. pozitivno prvo pražnjenje

Slika 2.7. prikazuje u logaritamsko-normalnoj razmjeri raspodjelu toplotnog impulsa atmosferskog pražnjenja ( $A = \int i^2 \cdot dt$ ) za negativno prvo pražnjenje (kriva sa oznakom 1), negativna atmosferska pražnjenja (kriva sa oznakom 2) i pozitivno prvo pražnjenje (kriva sa oznakom 3). Na apscisi je data vrijednost toplotnog impulsa u logaritamskoj razmjeri, a na ordinati je prikazana vjerovatnoća pojave toplotnog impulsa veće vrijednosti. Prave linije predstavljaju interpolaciju mjerenih rezultata.



Slika 2.7 Raspodjela toplotnog impulsa atmosferskog pražnjenja  
 1. negativno prvo pražnjenje, 2. negativna uzastopna pražnjenja, 3. pozitivno prvo pražnjenje

Utvrđeno je da se pozitivna pražnjenja sastoje od samo jednog udara ali mogu da prouzrokuju znatno štetniji uticaj i imaju razornije dejstvo zbog veće amplitude struje pražnjenja. Negativna pražnjenja se sastoje od prvog (glavnog) pražnjenja i više uzastopnih (pratećih)

pražnjenja zbog neutralizacije kompletnog električnog naelektrisanja oblaka, odnosno svih njegovih centara naelektrisanja [3].

Za vrijeme trajanja čela strujnog talasa raspodjela struja ka lokalnoj referentnoj i udaljenoj referentnoj zemlji zavisi dominantno od induktivnosti provodnih puteva (dominantan je induktivni otpor  $L \, di/dt$ , zbog brze promjene vrijednosti struja), za vrijeme trajanja začelja strujnog talasa dominantan je uticaj omske otpornosti i tada raspodjela struja najviše zavisi od toga [3].

Osim strujnih talasa koji su veoma destruktivni kod SCENARIJA II problematični mogu da budu i prenaponski talasi. Prenaponski talasi mogu da budu uzrokovani povećanjem potencijala uzemljivačkog sistema u odnosu na referentnu zemlju usljed proticanja izrazito visokih vrijednosti struja ka referentnoj zemlji kroz uzemljivačke sisteme. Prenaponi se mogu javiti i indukovanjem prenapona kao posledica magnetnog i električnog polja prouzrokovanog proticanjem struje atmosferskog pražnjenja ka referentnoj zemlji kroz susjedne instalacije [3].

Potpuno je jasno da je strujni talas dosta opasniji nego pomenute dvije vrste prenaponskog talasa ali se mora obratiti pažnja i na ovakve prenaponske talase i analizirati njihov uticaj. Zbog ograničenog i veoma skromnog broja mjerenja ovakvih atmosferskih pražnjenja direktno u gromobranski prihvatni sistem objekta nema konkretnih rezultata. Uzemljivački prenapon se najčešće modeluje kao jednosmjerni dugotrajan prenapon, dok indukovani prenaponi imaju oscilatorni oblik sa određenim prigušenjima [3].

### 3. MODELOVANJE ATMOSFERSKOG PRAŽNENJA U ELEKTRIČNIM INSTALACIJAMA NISKOG NAPONA

Jasno je da atmosferska pražnjenja mogu imati razorne posljedice kako na elemente visokonaponskih razvodnih postrojenja tako i na elemente i uređaje priključene na mrežu srednjeg naponskog nivoa (SN) i mrežu niskog naponskog nivoa (NN). Uticaj direktnih ili indirektnih atmosferskih pražnjenja može da ima izražena negativna dejstva na izolaciju uređaja i elemenata u niskonaponskoj mreži. Razvojem elektromobilnosti, sve većom popularizacijom, proizvodnjom i ugradnjom ogromnog broja punionica različitih snaga za električne automobile, na različitim lokacijama, predstavlja izazov za elektrodistributivnu mrežu u ustaljenom radnom režimu. Sa druge strane, tako ugrađene punionice za električne automobile mogu da predstavljaju, potencijalno slabu tačku elektroenergetskog sistema kada se pojave atmosferski prenaponi u mreži niskog napona.

Pojava atmosferskih prenapona u NN mreži je neminovna pojava, a njihov uticaj na punionice za električne automobile, kontrolne sisteme električnih automobila i baterijske sisteme može da bude jako negativan i dovede do oštećenja pojedinih elemenata. U cilju realizacije ispitivanja i simulacije uticaja atmosferskih prenapona na punionice za električne automobile potrebno je razviti odgovarajuće simulacione modele svih elemenata i uticajnih faktora.

Za formiranje simulacionog modela atmosferskog pražnjenja u električnim instalacijama niskog napona koristi se MATLAB/SIMULINK softver. Polazna osnova za razvoj modela za simulaciju prenaponskih i strujnih talasa u instalacijama niskog napona koristi skup informacija o njihovim talasnim oblicima, amplitudama i frekvencijama oscilovanja dobijenih na osnovu realnih mjerenja i analize atmosferskih pražnjenja u mrežama niskog napona.

Analizom velikog broja publikovnih radova sa ovim informacijama koje su prikazane u IEEE C62.41.1[3] i drugoj literaturi pokazuju da može postojati širok spektar naponskih i strujnih talasa koji se mogu očekivati u NN mreži. Veoma je zahtjevno, ekonomski neisplativo i gotovo nemoguće modelovati čitav spektar različitih prenaponskih i strujnih talasa koji se pojavljuju u NN mreži, a koji zavise od velikog broja trenutnih faktora. S toga je potrebno izvršiti grupisanja različitih vrsta prenaponskih i strujnih talasa koji se pojavljuju u NN mreži na osnovu scenarija atmosferskog pražnjenja, kategorije lokacije i stepena izloženosti električnih instalacija i uređaja. Iz tog razloga se formira nekoliko reprezentativnih talasa koji imaju za cilj da predstavljaju na adekvatan način sve potencijalne uticaje atmosferskog pražnjenja u NN mreži [18].

Uvođenje reprezentativnih talasa je pozitivno i sa strane sigurnosti, jer se na taj način uvodi stepen sigurnosti u simulacije i proračune. Podjela atmosferskog pražnjenja u ovom radu je izvršena na SCENARIO I i SCENARIO II.

### **3.1. Model direktnog udara atmosferskog pražnjenja - Scenario II**

Model direktnog atmosferskog pražnjenja za potrebe simulacija i analiza je moguće predstaviti na više načina, zavisno od standarda koji se primjenjuje. Tako postoji različit model i matematički zapis talasnog oblika struje na osnovu IEC i IEEE standarda, dok se u literaturi i za potrebe simulacija tranzijentnih procesa u elektroenergetskim sistemima i instalacijama često primjenjuje dvostruko eksponencijalni talasni oblik struje.

Direktni udar atmosferskog pražnjenja se prema IEC Std. 62305-1 modeluje kao idealni strujni izvor. Za potrebe simulacije struja udara se sastoji od sledećih komponenti [18]:

- prvog udara pozitivnog ili negativnog polariteta
- narednih udara negativnog polariteta
- dugotrajnog udara pozitivnog ili negativnog polariteta

Prvi udar atmosferskog pražnjenja se modeluje kao strujni izvor talasnog oblika  $10/350\mu\text{s}$ , dok se naredni udari atmosferskog pražnjenja modeluju sa talasnim oblikom struje  $0.25/100\mu\text{s}$ . Udar dugog trajanja može da se opiše pravouganim talasnim oblikom sa srednjom strujom  $I$  i vremenom  $T$  [18].

Na osnovu IEEE standarda se ne daje definicija niti vrijednost amplitude za direktni udar atmosferskog pražnjenja u prihvatni sistem spoljašnje gromobranske instalacije, pod tvrdnjom da je veoma teško i netačno definisati jedinstven talasni oblik za ovaj slučaj. Ovi standardi daju samo kratki komentar na modelovanje direktnog atmosferskog pražnjenja na osnovu IEC standarda. Matematički zapis talasnog oblika struje direktnog atmosferskog pražnjenja na osnovu IEEE standarda se razlikuje u odnosu na IEC standard [18].

Sve relacije za direktno atmosfersko pražnjenje na osnovu IEEE i IEC standarda kao i relacija sa dvostruko eksponencijalnim talasnim oblikom daju sličan talasni oblik struje sa manjim odstupanjima koja su u okviru tolerancije oba standarda [18].

Pored navedenih se za proračune zavisno od željene tačnosti i kompleksnosti problema koriste i drugi strujni talasni oblici koji modeluju atmosfersko pražnjenje kao što su: uprošćeni eksponencijalni oblik, talas linearnog čela i linearnog začelja, talas linearnog čela i konstantnog začelja i talas beskonačne strmine čela i konstantnog začelja [18].

### 3.2. Model atmosferskog pražnjenja - Scenario I

Na osnovu analize prenapona koji se mogu pojaviti na osnovu Scenario I, reprezentativni prenaponski i strujni talasi u NN instalacijama se mogu na osnovu ovog scenarija podjeliti u dvije grupe[18]:

- Standardni talasni oblici
- Dodatni talasni oblici

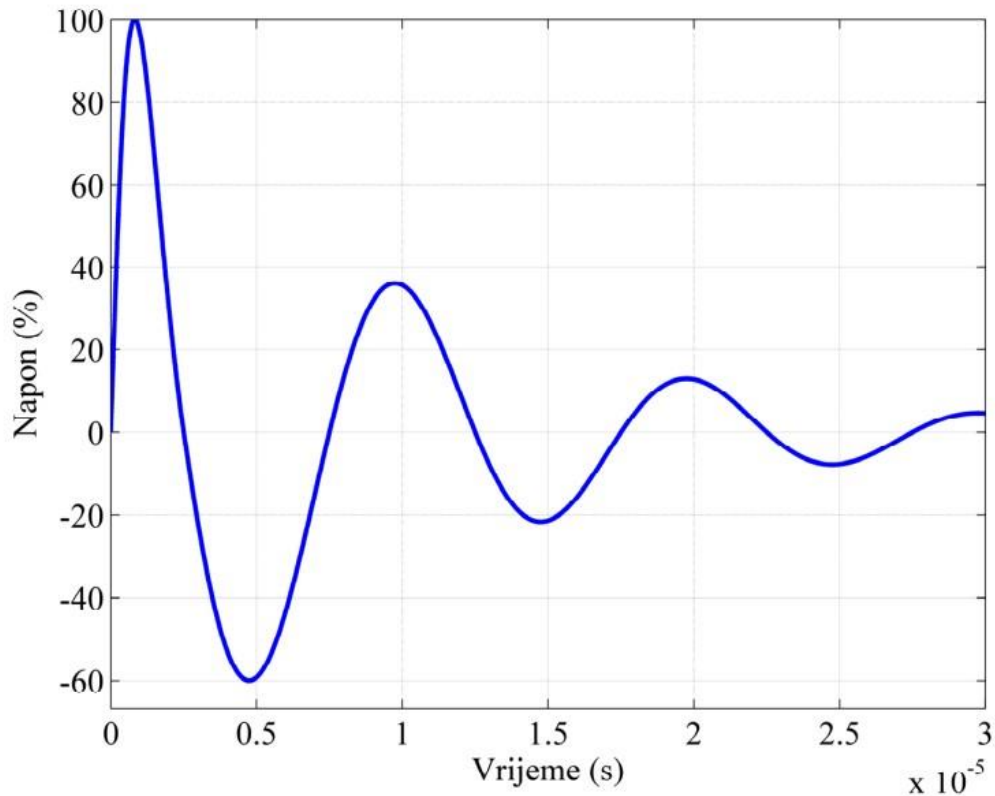
#### 3.2.1. Standardni talasni oblici

Ovi talasni oblici imaju dugu istoriju izuzetno uspješne primjene u industriji i zbog toga se mogu smatrati veoma pouzdanim za testiranje najvećeg dijela opreme priključene na instalacije niskog napona [18].

- 100kHz Oscilatorni talas („100kHz Ring Wave“)
- Kombinovani talas („Combination wave“)
- Odvojeni naponski 1.2/50 $\mu$ s i strujni 8/20 $\mu$ s talas

##### 3.2.1.1. 100kHz Oscilatorni talas („100kHz Ring Wave“)

Ovaj prenaponski talas predstavlja talasni oblik kojim se modeluje indukovani prenaponski talas u provodnicima električne instalacije indukovanih putem magnetnog i električnog polja kroz posmatranu strukturu. Oblik ovog talasa je prikazan na slici 3.1 [18].



Slika 3.1 – 100kHz Ring Wave[18]

Karakteristike ovog talasnog oblika i dozvoljene tolerancije su [18]:

- Vrijeme trajanja čela talasa:  $0.5\mu\text{s}$  (tolerancija  $\pm 0.15\mu\text{s}$ ). Vrijeme trajanja čela talasa se definiše kao vrijeme između postizanja 10% i 90% amplitude talasa na njegovom čelu.
- Frekvencija oscilovanja 100kHz (tolerancija  $\pm 20\text{kHz}$ )
- Tolerancija u pogledu amplitude talasa (u zavisnosti od kategorije lokacije) je  $\pm 10\%$
- Prigušenje talasa je definisano smanjivanjem amplitude pojedinih lokalnih minimuma i maksimuma (pikova) i to kako slijedi:
  - odnos amplitude drugog pika prema amplitudi prvog pika je između 40% i 90%
  - odnos amplitude trećeg pika prema amplitudi drugog pika, kao i amplitude četvrtog pika prema amplitudi trećeg pika je između 40% i 80%, za ostale redne brojeve pikova nema potrebe računati jer su značajno manje vrijednosti koje nemaju uticaj ni na najosjetljiviju opremu.
- Za ovaj talasni oblik se ne definiše prateći strujni talas, osim vrijednosti amplitude struje.



Amplitude napona i struja za ovaj talasni oblik, u zavisnosti od kategorije lokacije su predstavljene u tabeli 3.1. Ova tabela se odnosi na primjenu talasa između faznih provodnika, faznog i nultog provodnika, i nultog i neutralnog provodnika [18].

Tabela 3.1. Očekivane amplitude napona i struje za 100kHz oscilatorni talas[18]

Kategorija lokacije	Amplitude		Efektivna impedansa( $\Omega$ )
	Napon(kV)	Struja(kA)	
A	6	0.2	30
B	6	0.5	12

Za slučaj testiranja sa primjenom 100kHz oscilatornog talasa između neutralnog i zaštitnog provodnika standard IEEE Std C62.41.2 [14] daje drugačije vrijednosti u odnosu na tabelu 1.

Na osnovu standarda IEEE C62.45 [19] navedeno je da je odnos amplitude između drugog i prvog pika naponskog talasa između 40% i 110% što je drugačije od standarda IEEE C62.41.2 [14] i koji označava da je taj odnos amplituda naponskog talasa drugog i prvog pika između 40% i 90% što je mnogo indikativnije, jer se u slučaju 110% ostavlja mogućnost da drugi pik ima veću amplitudu od amplitude prvog pika naponskog talasa [18].

Jednačina koja zadovoljava uslov da je odnos amplitude naponskog talasa drugog i prvog pika u granicama 40% i 90% glasi [18]:

$$V(t) \begin{cases} B \cdot V_p \cdot y(t) \cdot (1 + \eta \cdot y(t)), & 0 \leq t \leq 2.5\mu s \\ B \cdot V_p \cdot y(t), & t > 2.5\mu s \end{cases} \quad (3.1)$$

gdje je:

$$y(t) = A \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \cdot \cos(\omega t)$$

$$A = 1.590$$

$$B = 0.6205$$

$$\eta = 0.523$$

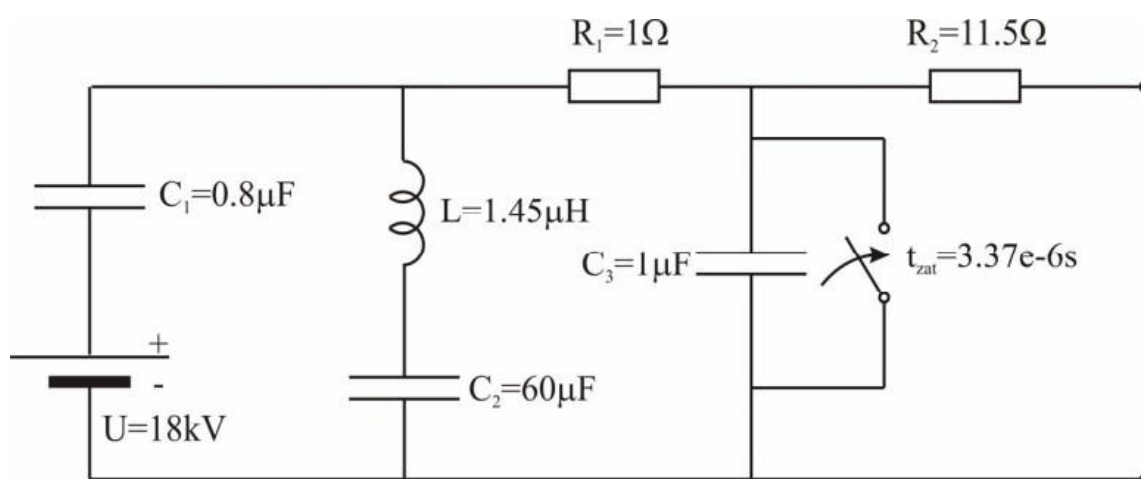
$$\tau_1 = 0.4791\mu s$$

$$\tau_2 = 9.788 \mu s$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 10^5 \text{ rad/s}$$

Na slici 3.2 je prikazano električno kolo 100kHz oscilatornog talasa za kategoriju B, amplitude napona 6kV i struje 0.5kA. Ovo električno kolo je za potrebe master rada modelovano u MATLAB/SIMULINK softverskom paketu i dobijene su sledeće karakteristike:[18]

- Vrijeme trajanja čela talasa: 0.523μs
- Odnos amplitude drugog pika prema amplitudi prvog pika: 81.45%
- Odnos amplitude trećeg pika prema amplitudi drugog pika: 66.95%
- Odnos amplitude četvrtog pika prema amplitudi trećeg pika: 47.65%
- Frekvencija oscilovanja: 102.43kHz

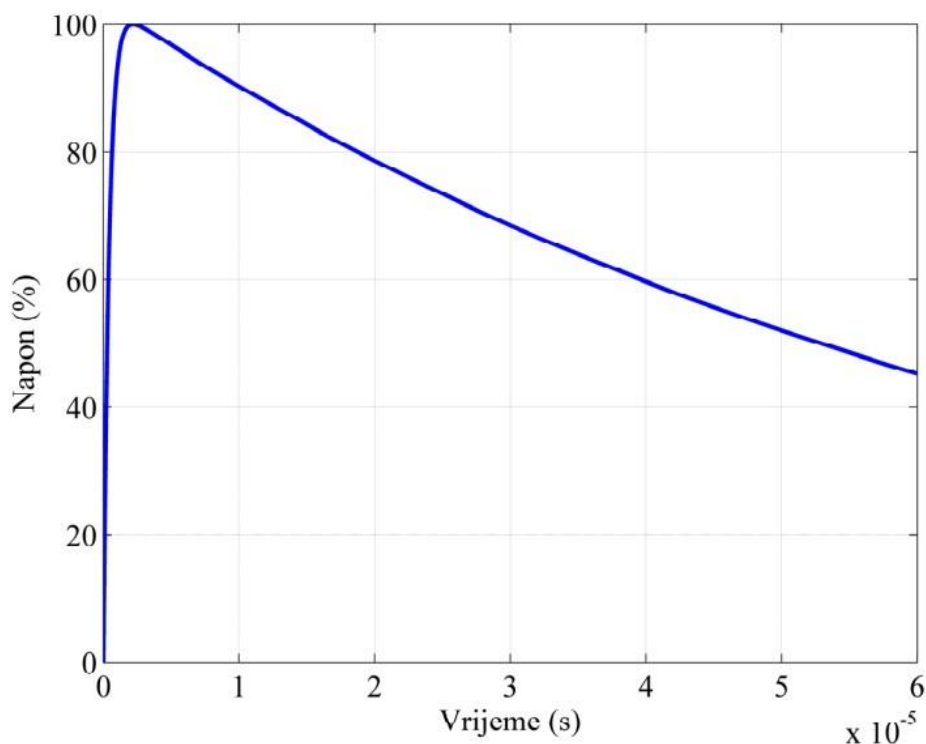


Slika 3.2 – Električno kolo za 100kHz oscilatorni talas[18]

Primjećuje se da su dobijene vrijednosti u skladu sa definisanim vrijednostima na osnovu IEEE standarda. Za slučaj druge kategorije lokacije i potrebnih drugih vrijednosti amplituda napona i struja dovoljno je samo korigovati određene vrijednosti na električnom kolu koje je prikazano na slici 3.2. Za potrebe korekcije amplitude napona dovoljno je korigovati vrijednost napona na jednosmjernom generatoru, a za potrebe korekcije struje, dovoljno je korigovati vrijednost otpornosti  $R_2$  [18].

### 3.2.1.2. Kombinovani talas („Combination Wave“)

Kombinovani talas se simulira uz pomoć simulacije generatora („Generator kombinovanog talasa“), taj generator je modelovan na način da u praznom hodu generiše naponski talas oblika 1.2/50μs, dok u kratkom spoju generiše struju talasnog oblika 8/20μs. Napon talasnog oblika 1.2/50μs je dat na slici 3.3 [18].

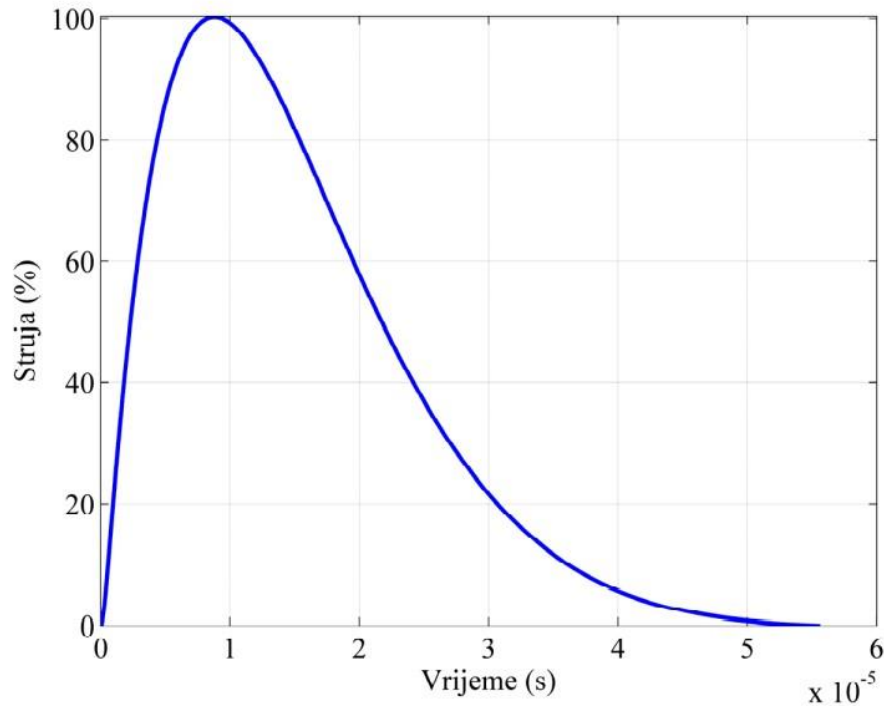


Slika 3.3. – Naponski talas 1.2/50µs[18]

Karakteristike i dozvoljene tolerancije ovog talasnog oblika su:[18]

- Vrijeme trajanja čela talasa je  $1.2 \mu\text{s} \pm 0.36 \mu\text{s}$ . Vrijeme trajanja čela talasa se definiše kao  $1.67(t_{30} - t_{90})$ , gdje su  $t_{30}$  i  $t_{90}$  vremenski trenuci kada naponski talas dostiže 30% odnosno 90% vrijednosti amplitude talasa na svom čelu.
- Vrijeme trajanja talasa je  $50 \mu\text{s} \pm 10 \mu\text{s}$ . Vrijeme trajanja talasa se definiše kao vrijeme koje protekne između virtuelnog početka i trenutka kada talas dostigne 50% vrijednosti amplitude na svom začelju. Virtuelni početak se dobija u presjeku prave koja prolazi kroz tačke 30% i 90% vrijednosti amplitude na čelu talasa i pravom koja predstavlja vremensku osu.
- Tolerancija amplitude talasa, zavisno od kategorije lokacije je  $\pm 10\%$ .

Grafik strujnog talasa je dat na slici 3.4 [18].



Slika 3.4 – Strujni talas 8/20 $\mu$ s [18]

Karakteristike i dozvoljene tolerancije ovog talasnog oblika su sledeće [18]:

- Vrijeme trajanja čela talasa 8 $\mu$ s (+1.0, -2.5)  $\mu$ s. Vrijeme trajanja čela talasa se definiše kao:  $1.25(t_{90} - t_{10})$ , gdje su  $t_{10}$  i  $t_{90}$  vremenski trenuci kada strujni talas dostiže 10% odnosno 90% vrijednosti amplitude na svom čelu.
- Vrijeme trajanja talasa: 20  $\mu$ s (+8, -4)  $\mu$ s. Vrijeme trajanja talasa se definiše kao vrijeme između trenutka virtuelnog početka i trenutka kada talas dostigne 50% vrijednosti amplitude na svom začelju. Virtuelni početak se dobija u presjeku prave koja prolazi kroz tačke 30% i 90% vrijednosti amplitude na čelu talasa i pravom koja predstavlja vremensku osu.
- Tolerancija amplitude talasa, zavisno od kategorije lokacije je  $\pm 10\%$ .

Kombinovani talas ima navedene vrijednosti naponskog i strujnog talasa pri idealnim uslovima praznog hoda, odnosno kratkog spoja. Međutim, te vrijednosti napona i struja zavise od ispitivanog električnog kola i vrijednosti impedanse. Kombinovani talas je našao odličnu primjenu upravo za uređaje nepoznate impedanse. Naponski talas se odlično pokazao za ispitivanje dielektrične čvrstoće, dok strujni talas pokazuje dobre osobine kod ispitivanja na injektiranje veoma visokih vrijednosti struja i toplotnih impulsa u uređaje za zaštitu od prenapona, a posebno odvodnike prenapona. S obzirom da oba ova talasa predstavljaju fenomen atmosferskog pražnjenja potrebno ih je ukombinovati za slučaj odziva električnog kola nepoznate impedanse [18].

Amplitude naponskog i strujnog kombinovanog talasa su date u tabeli 3.2 zavisno od kategorije lokacije. Ova tabela daje informacije o primjeni talasa između faznih provodnika kao i faznog i nultog i faznog i neutralnog provodnika [18].

*Tabela 3.2 Očekivane amplitude napona i struja kombinovanog talasa[18]*

Kategorija lokacije	Amplitude		Efektivna impedansa( $\Omega$ )
	Napon(kV)	Struja(kA)	
A	6	0.5	12
B	6	3	2
C-mala izloženost	6	3	2

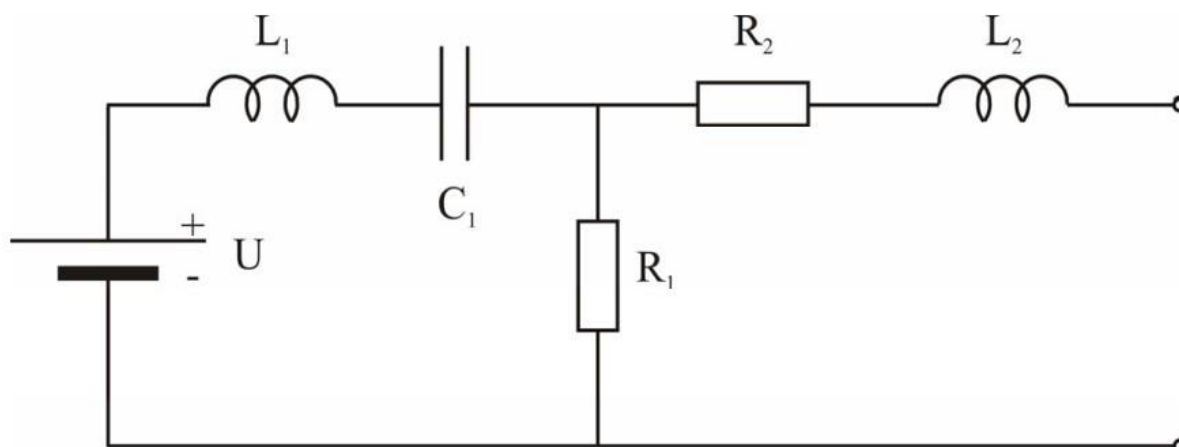
Za ispitivanje amplituda napona i struja kombinovanog talasa između nultog i neutralnog provodnika IEEE C62.41.2[14] daje sledeće vrijednosti prikazane u tabeli 3.3. Prikazane vrijednosti zavise od vrste sistema, stepena izloženosti i udaljenosti ispitivanog uređaja ili dijela električne instalacije od izvora talasa [18].

*Tabela 3.3 Očekivane amplitude napona za kombinovani talas primjenjen između nultog i neutralnog provodnika[18]*

Vrsta sistema električne instalacije	Udaljenost od izvora talasa	Izloženost	Amplituda napona (kV)	Efektivna impedansa( $\Omega$ )
TN-C-S	Bliska	Bilo koja	-	-
	Mala	Bilo koja	-	-
	Velika	Bilo koja	-	-

Vrsta sistema električne instalacije	Udaljenost od izvora talasa	Izloženost	Amplituda napona (kV)	Efektivna impedansa( $\Omega$ )
TN-S	Bilo koja	Mala	2	2
	Bilo koja	Srednja	4	2
	Bilo koja	Velika	6	2

Električno kolo generatora kombinovanog talasa koje se koristi kao simulacioni model u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK i ima zadatak da što bolje predstavi stvarne parametre kombinovanog talasa je prikazano na slici 3.5.



3.5 Generator kombinovanog talasa

Parametri generatora kombinovanog talasa koji omogućavaju simulaciju traženih uslova za amplitude pojedinih kategorija lokacija (datih u tabeli 3.2) su prikazani u tabeli 3.4 [18].

Tabela 3.4 Parametri generatora kombinovanog talasa sa slike 3.5.[18]

Kategorija lokacije	U(kV)	L1( $\mu$ H)	C1( $\mu$ F)	R1( $\Omega$ )	R2( $\Omega$ )	L2( $\mu$ H)
A	10.24	15	1.95	37	8.25	25
B i C	6.247	2.45	12.5	5.83	1.41	4

Kao što je rečeno, IEEE kao i IEC standardi definišu iste talasne oblike. Osnovna razlika koja postoji kod definicija istih talasnih oblika jeste dozvoljeni nivo promjene polariteta napona i struje. Naime, u odnosu na IEEE standarde koji kao što se vidi na slikama 3.3 i 3.4 ne definišu nikakvu promjenu polariteta, standard IEC Std. 61000-4-5 [20] definiše da i naponski i strujni talas mogu da imaju promjenu polariteta nakon što prođu kroz nultu vrijednost na začelju talasa. Dozvoljena vrijednost amplitude talasa promijenjenog polariteta iznosi 30% amplitude talasa [18].

### 3.2.1.3. Naponski 1.2/50 $\mu$ s talas i strujni 8/20 $\mu$ s talas

Odvojeni naponski ili strujni talas koristi se u slučajevima kada postoji potreba da se testira uređaj čija je impedansa poznata, odnosno kada je neophodno testirati uređaj sa aspekta proboja, preskoka ili provođenja struje. Na osnovu standarda IEEE Std. C62.45[19] za slučajeve visoke impedanse koristi se naponski talas, dok se u situacijama niske impedanse koristi strujni talas [18].

Ove vrste talasa se najčešće koriste prilikom testiranja UZP i to pažljivim podešavanjem generatora talasa tako da i nakon priključenja UZP struja generatora bude definisanog talasnog oblika i amplitude [18].

Matematička relacija kojom se opisuje naponski talas  $1.2\mu s$  [18]:

$$V(t) = A \cdot V_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3.2)$$

gdje je:

$$\tau_1 = 0.4074 \mu s$$

$$\tau_2 = 68.22 \mu s$$

$$A = 1.037$$

$V_p$  – amplituda napona

Matematička relacija kojom se opisuje  $8/20\mu s$  strujni talas je [18]:

$$I(t) = A \cdot I_p \cdot t^3 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.3)$$

gdje je:

$$\tau = 3.911 \mu s$$

$$A = 0.01243 \mu s^{-3}$$

$I_p$  – amplituda struje

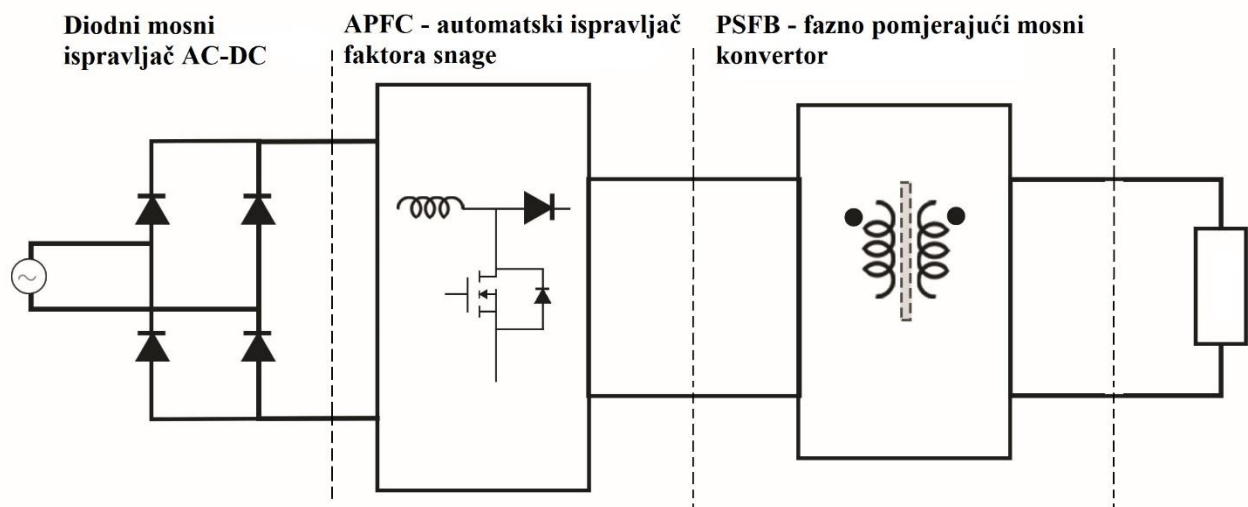
## 4. MODELOVANJE PUNIONICE ZA ELEKTRIČNE AUTOMOBILE

Za potrebe ispitivanja uticaja atmosferskog pražnjenja na punionice za električne automobile u niskonaponskoj mreži razvijen je simulacioni model po uzoru na uobičajeni električni punjač snage 3.8kW [21].

Naime, simulaciona šema ovog punjača je razvijena tako da se sastoji od više zasebnih dijelova koji zajedno čine kompaktnu cjelinu i predstavljaju vrlo reprezentativan simulacioni model standardnog AC punjača za električna vozila snage ~4kW.

Model punionice za električna vozila dat na slici 4.1, radi lakše analize je podjeljen na tri osnovna dijela, i to:

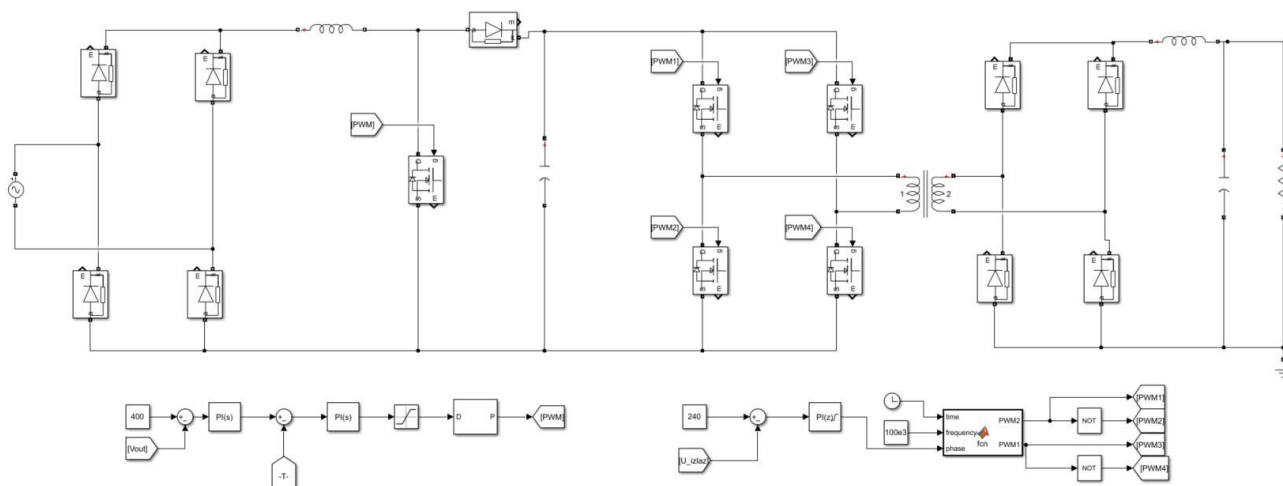
- Diodni mostni ispravljač AC-DC
- APFC – automatski ispravljač faktora snage (Automatic Power Factor Correction)
- PSFB – fazno pomjerajući mostni konvertor (Phase-Shifted Full-Bridge Converter)



Slika 4.1 Šematski prikaz punionice za električne automobile

Simulacioni model u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK je prikazan na slici 4.2, bez pratećih elemenata za mjerenje i očitavanje podataka, koji bi umnogome opteretili prikaz simulacionog modela.





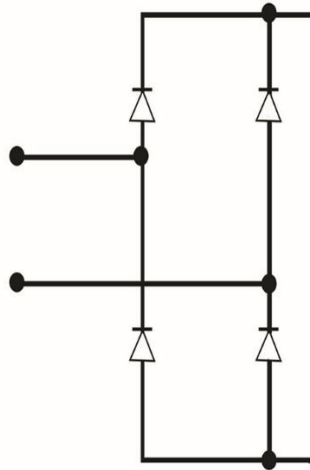
Slika 4.2 Simulacioni model punionice za električne automobile MATLAB/SIMULINK

#### 4.1. Diodni mostni ispravljač

Kako električna energija postaje sve važniji faktor u životu ljudi, različiti uređaji zahtijevaju jednosmjerne (DC) i strogo kontrolisane vrijednosti naponskih i strujnih veličina na svom ulazu. Stoga je neophodno izvršiti odgovarajuće konverzije kako bi se električni parametri napojnih mreža 230VAC i 50Hz prilagodili potrebama pojedinih uređaja i omogućili im nesmetano funkcionisanje [22].

Najprimjenjeniji oblik konverzije koji se danas koristi u industriji jeste AC-DC konverzija. Strujni krug koji vrši ovakav zadatak poznatiji je kao ispravljački uređaj, koji ima zadatak da naizmjeničnu struju iz mreže konvertuje u jednosmjernu koju koriste mnogi uređaji pri svom radu, a između ostalog i baterijski sistemi koji se koriste u električnim automobilima kao uređaji za skladištenje električne energije. Pored jednosmjerne struje i napona, potreban je i visok stepen kvaliteta električne energije [22].

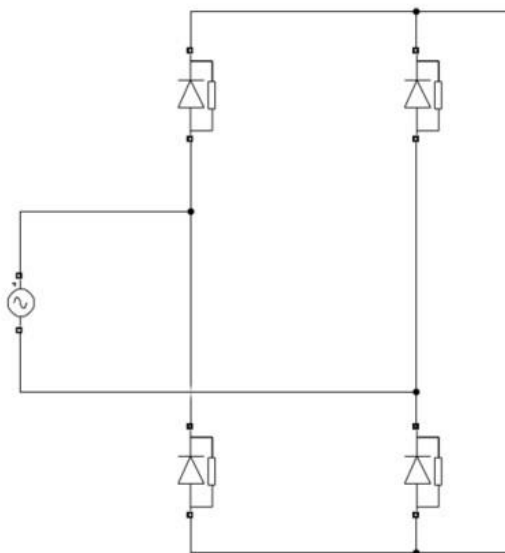
Diodni mostni ispravljači (slika 4.3) su široko rasprostranjeni i nalaze se u svakodnevnoj upotrebi. Oni su sastavni dijelovi velikog broja kućnih uređaja ali i mnoge druge električne opreme kao što su punionice za električne automobile [21].



*Slika 4.3 Šema diodnog mostnog ispravljača [22]*

Međutim, veliki problem ovih uređaja jeste faktor snage, pojava viših harmonika i izrazito negativan uticaj na kvalitet električne energije. Ispravljač faktora snaga – PFC jeste adekvatno rešenje i mogućnost zajedničkog rada i nadopunjavanja.

Dio simulacione šeme u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK koji vrši funkciju diodnog mostnog ispravljača i generator mrežnog jednofaznog napona su prikazani na slici 4.4.



*Slika 4.4. Simulacioni model generatora jednofaznog napona i diodnog mostnog ispravljača MATLAB/SIMULINK*

Diodni mostni ispravljač jeste uređaj energetske elektronike koji se koristi za ispravljanje naizmjenične AC u jednosmjernu DC struju. Ovaj uređaj se sastoji od četiri diode raspoređene u most.

## 4.2.APFC – automatski ispravljač faktora snage

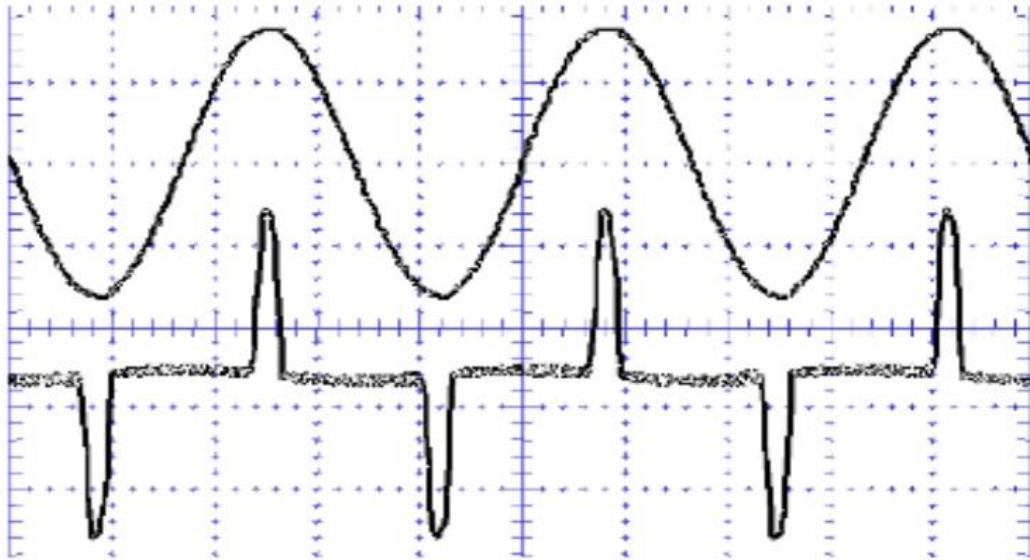
Sa razvojem tehnologije i porastom elektrifikacije u industriji, ljudi imaju sve veće zahtjeve za nivoom kvaliteta električne energije [22].

Kada je riječ o faktoru snage, neophodno je napraviti osnovnu podjelu na linearna i nelinearna strujna kola. Kod linearnih strujnih krugova kao referentan podatak za faktor snage je korišćen  $\cos\varphi$ , s tim da  $\varphi$  predstavlja fazni stav između sinusnog talasnog oblika napona i sinusnog talasnog oblika struje. Kako diode u ispravljačkom kolu nisu linearne, ulazni sinusni napon ne prati sinusni talasni oblik struje. Tako da faktor snage za linearna električna kola nije istovjetan, nego kod AC-DC konvertora, koristimo PF (power factor) [22].

Usljed sve intenzivnije primjene uređaja energetske elektronike, nizak faktor snage, pojava viših harmonika i reaktivne energije u mreži je sve izraženija. Kao jedno rešenje se nametnula tehnika popravke faktora snage (PFC – power factor correction) koja ima dva osnovna cilja, a to je popravak faktora snage i održavanje konstantnog izlaznog napona. Tehnologija za popravku faktora snage se može podijeliti na dvije osnovne kategorije, a to su *automatski ispravljač faktora snage* i *pasivni ispravljač faktora snage* [22]:

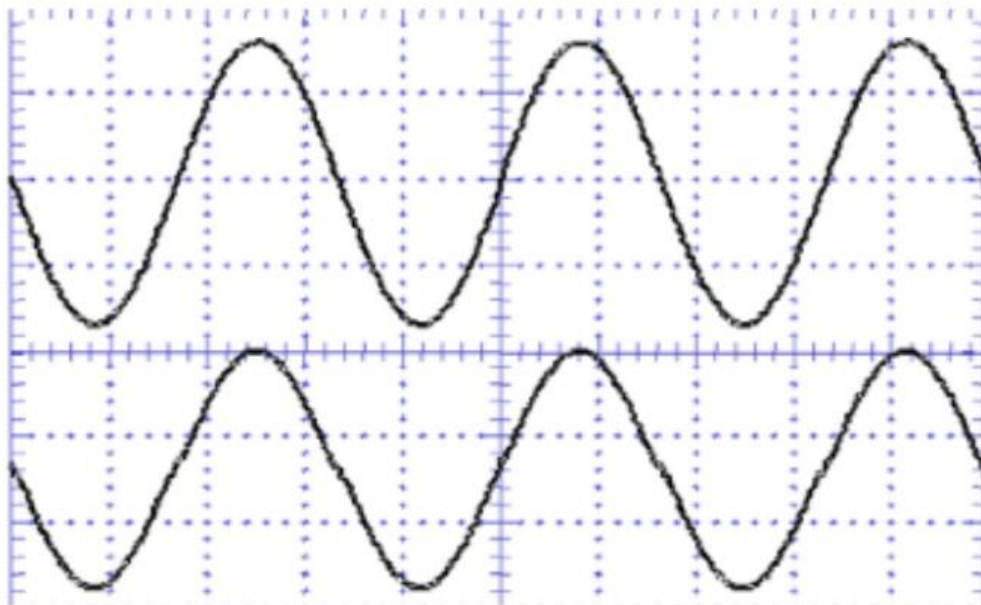
Aktivna tehnologija PFC-a koristi elektronske komponente kao što su pretvarači, prekidači, senzori, kontroleri kako bi automatski održavala faktor snage blizu jedinične vrijednosti. APFC ili automatski ispravljač faktora snage smatra se boljim, učinkovitijim i fleksibilnijim od pasivne tehnologije PFC-a ali je ujedno zahtjevniji za implementaciju i značajno skuplji. Pomenuta tehnologija ispravke faktora snage integriše u svoj sistem automatski prekidač ili MOSFET u sklopu ispravljačkog kola, koji kontrolisanim upravljanjem, otvaranjem i zatvaranjem omogućava da ulazna struja gotovo idealno prati napon i time značajno popravi faktor snage.

Ulazni AC napon se konvertuje uz pomoć diodnog mostnog pretvarača i pretvara u jednosmjerni DC napon. Međutim kondenzator u izlaznom filteru se veoma brzo puni, a sporo prazni što uzrokuje nagle poraste vrijednosti struje i pojavu pikova koji nemaju sinusni oblik. Ovo je osnovni razlog niskog power faktora, pojave viših harmonika i niza negativnih posledica koje ovakav režim rada uzrokuje. Ulazni talasni oblik struje ne prati talasni oblik napona (slika 4.5).



*Slika 4.5 Strujni i naponski talasni oblik bez ispravljača faktora snage [23,24]*

Kako bi se izbjegao ovaj problem, popravio power faktor, a samim tim prevazišli svi prateći negativni efekti i uspostavio zadovoljavajući radni režim koristi se automatski ispravljač faktora snage. Naime, pomenuti konvertor ima mogućnost da generiše teorijski power faktor (PF) blizak jedinici, kao što se vidi na slici 4.6.

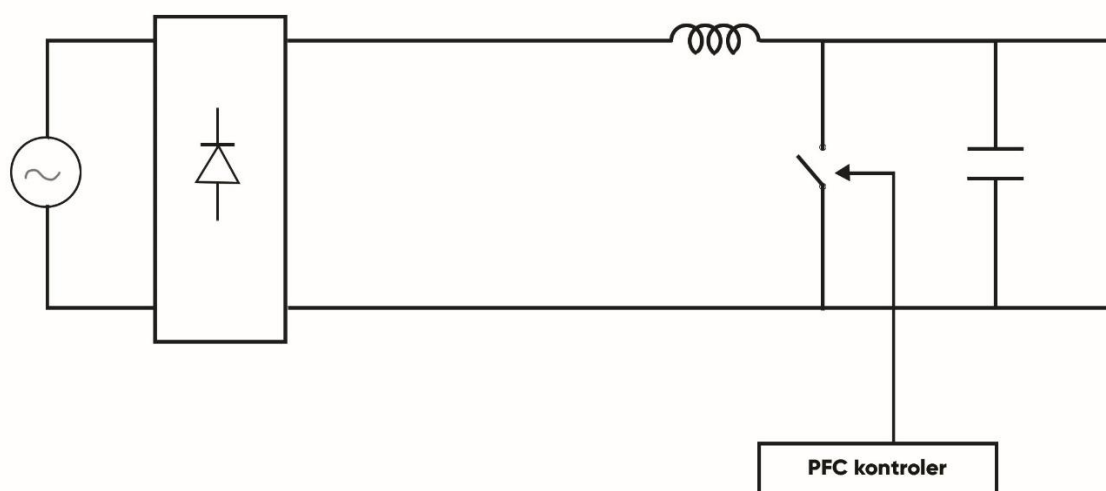


*Slika 4.6 Strujni i naponski talasni oblik sa ispravljačem faktora snage [24]*

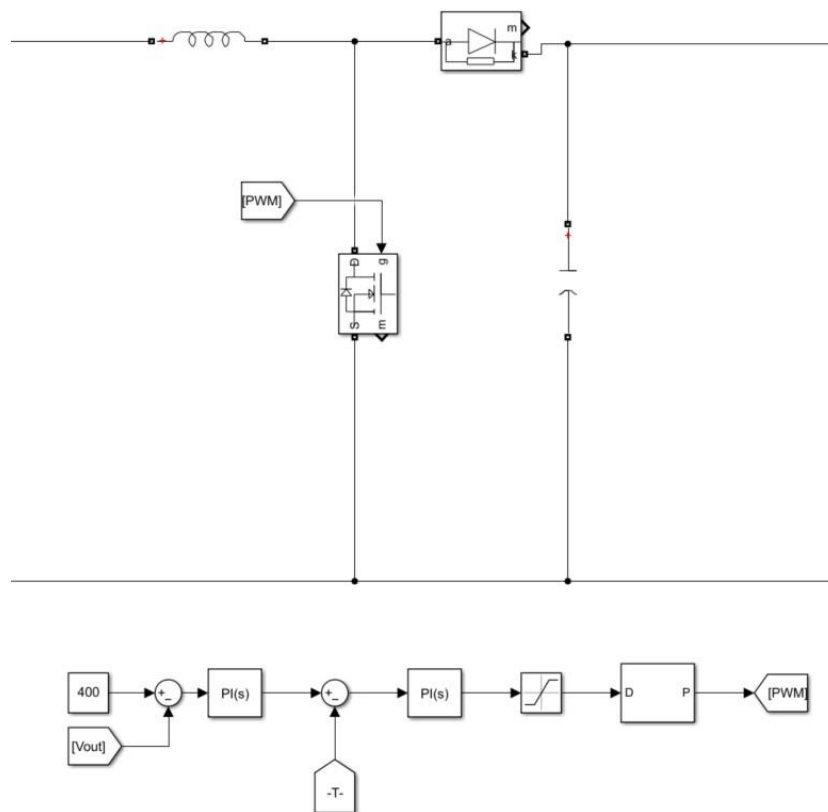
Princip konstrukcije aktivnog ispravljača faktora snage (APFC) sastoji se iz dva dijela, osnovnog (glavnog) strujnog kruga i kontrolnog strujnog kruga (pojačavač greške napona, pojačavač greške struje i modulator širine impulsa - PWM). Kontrolni sistem funkcioniše tako što

se prvo upoređuju referentni napon i napon na ulazu i šalju se na pojačavač, zatim se upoređuje struja na ulazu, dok na kraju djelovanjem na MOSFET (uključivanje-isključivanje) reguliše se struja tako da ima isti fazni stav kao i ulazni napon [22].

Postoji više vrsta APFC uređaja za modelovanje punionice za električne automobile, a za potrebe ovog rada se koristio BOOST APFC dat na slici 4.7, dok je njegov simulacioni model u softverskom paketu prikazan na slici 4.8 [22].



Slika 4.7 Šematski prikaz BOOST APFC-a



Slika 4.8 Simulacioni model BOOST APFC-a MATLAB/SIMULINK

Osnovna dva zadatka ovog uređaja su:

- Postizanje zadovoljavajućeg power faktora, bliskog jediničnoj vrijednosti
- Stabilan DC napon na izlazu

Za potrebe formiranja simulacionog modela APFC-a, neophodno je precizno odrediti vrijednosti i ulazne parametre za sve elemente koji čine strukturu APFC-a.

Proces modelovanja (dizajna) automatskog ispravljača faktora snage (APFC-a) sačinjen je od dvije cjeline:

- APFC boost konvertora
- APFC kontrolera

Proces modelovanja se može uraditi na osnovu ulaznih podataka dobijenih iz realnih modela punionica za električne automobile [21, 22, 23, 24].

Osnovni ulazni podaci u analiziranom primjeru su:

- 1) Izlazna snaga  $P_o = 3.8kW$
- 2) Ulazna snaga  $P_{in} = 3.8kW$
- 3) Opseg naizmjeničnog (AC) ulaznog napona 190-250VAC ( $V_{in} = 230VAC$ )
- 4) Mrežna frekvencija  $f = 50Hz$
- 5) Jednosmjerni (DC) izlazni napon  $V_o = 400VDC$
- 6) Frekvencija prekidača  $f_s = 65kHz$

#### 4.2.1. Modelovanje (dizajn) APFC boost konvertora

Proces dizajna APFC boost konvertora u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK (slika 4.8) moguće je uraditi na osnovu polaznih podataka koji se oslanjaju na stvarni model punionice za električne automobile snage 3.8kW i realnih parametara napojne niskonaponske mreže [21, 22].

##### 4.2.1.1. Modelovanje induktivnosti L

Proračun induktivnosti je od značaja kako bi varijacije ulazne struje bile svedene u zadovoljavajući opseg. Relacije kojim se izražava vrijednost induktivnosti su date u nastavku:

$$V_{in} = L \frac{\Delta I_L}{DT_s} \quad (4.1)$$

$$L = \frac{V_{in}DT_s}{\Delta I_L} = \frac{V_{in}D}{f_s \Delta I_L} \quad (4.2)$$

gdje je:

$L$  – induktivnost

$\Delta I_L$  – vrijednost varijacija ulazne struje

$D$  – koeficijent radnog ciklusa (uključenja-isključenja)

$T_s$  – period uključenja-isključenja

Proračun maksimuma ulazne struje  $I_{max}$ , vrijednost varijacije ulazne struje (ripple current  $\Delta I_L$ ) čija maksimalna vrijednost iznosi 20% maksimalne vrijednosti struje  $I_{max}$ , koeficijenta uključenja-isključenja  $D$  (duty cycle) se dobijaju iz sledećih relacija:

$$I_{max} = \frac{\sqrt{2}P_{in}}{V_{in(min)}} = 28.28A \quad (4.3)$$

$$\Delta I_L = 0.2I_{max} = 5.67A \quad (4.4)$$

$$D = \frac{V_o - \sqrt{2}V_{in(\min)}}{V_o} = 0.33 \quad (4.5)$$

$$L = 0.26mH \quad (4.6)$$

#### 4.2.1.2. Modelovanje izlazne kapacitivnosti C

Vrijednost izlazne kapacitivnosti zavisi od više različitih faktora, dobija se iz sledeće relacije:

$$C = \frac{2P_o\Delta t}{U_o^2 - U_{o(\min)}^2} = 3.04mF \quad (4.7)$$

gdje su:

$\Delta t$  – vrijeme zadržavanja. Ovo vrijeme kondenzator u kolu ima sposobnost da održava naponske parametre na željenom nivou. Uobičajena praksa je da se vrijeme zadržavanja postavi na vrijednost između 10-20ms odnosno između pola i cijelog perioda oscilacija ulaznog napona 50Hz/60Hz. Za potrebe ove simulacije vrijednost vremena zadržavanja je postavljena na  $\Delta t = 15ms$ .

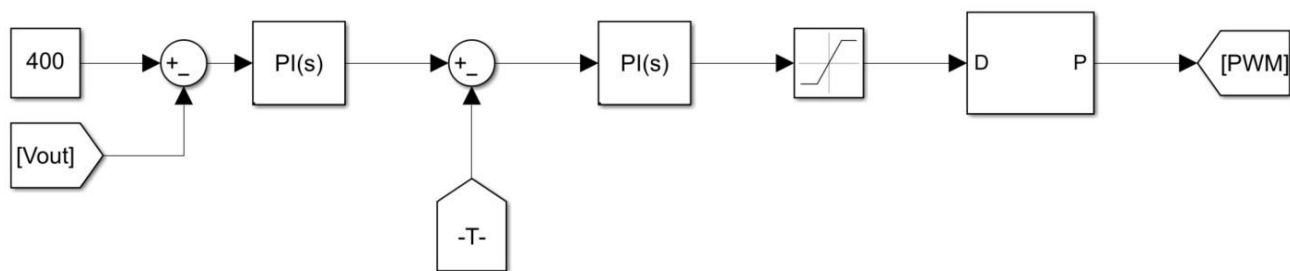
$U_{o(\min)}$ - vrijednost minimalnog izlaznog DC napona  $U_{o(\min)} = 350VDC$ .

#### 4.2.2. Modelovanje APFC kontrolera

APFC – automatski ispravljač faktora snage ima dvostruku ulogu, a to je popravak power faktora i održavanje stabilnosti napona. Stoga, APFC kontroler zahtjeva dvije povratne informacije, a to su informacija o vrijednosti napona kao i informacija o vrijednosti struje koje dobija simultano i formira dvostruku kontrolnu petlju. Jedna petlja služi za održavanje stabilne vrijednosti napona na izlazu, dok druga petlja prati sinusni oblik struje na ulazu i osigurava da struja zadrži standardni sinusni oblik identičnog faznog stava kao i ulazni napon i tako održi power faktora (PF) na približno jediničnoj vrijednosti.

Simulacioni model je predstavljen na slici 4.9. Frekvencija generatora impulsno širinske modulacije postavljena je na vrijednost od 65kHz. Odabrani referentni napon je 400VDC kako bi se na izlazu APFC-a zadržao stabilan i konstantan napon.





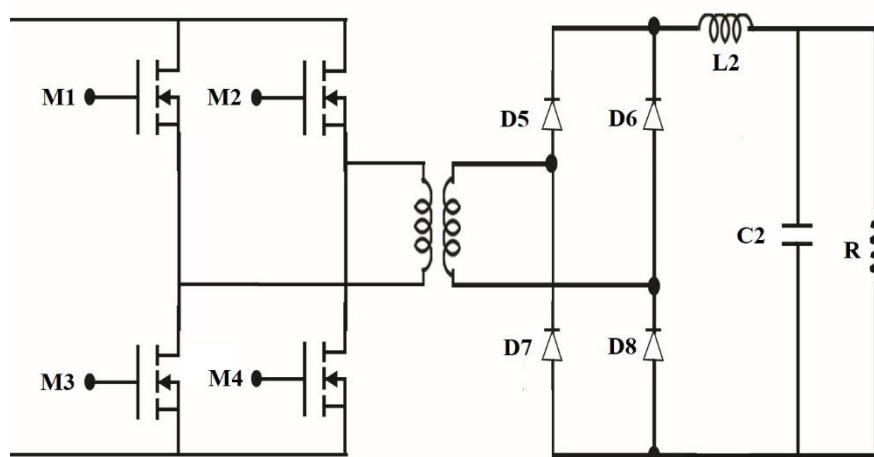
Slika 4.9 Simulacioni model PFC kontrolera

### 4.3.PSFB – fazno pomjerajući mostni konvertor

Precizno i strogo kontrolisan proces punjenja baterije električnog automobila omogućava ispravno punjenje i duži životni vijek baterijskog sistema. Za potrebe napajanja baterije električnih automobila neophodno je da izlazni napon i struja budu precizno kontrolisani. Za potrebe pravilnog punjenja baterije električnog automobila, neophodno je regulisati obje veličine. Najprimjenjeniji algoritam punjenja baterijskih sistema se zasniva na konstantnoj vrijednosti napona i struje i sporom punjenju („trickle charge“) [25].

PSFB konvertor (slika 4.10) se sastoji iz više komponenti:

- inverter
- transformator
- ispravljač
- izlazni filter



Slika 4.10 Šematski prikaz fazno pomjerajućeg mostnog konvertora PSFB [25]

PSFB može izdržati znatno više vrijednosti napona i struje bez potrebe za povećanjem gabarita konvertora. To je moguće zbog rada na visokim frekvencijama i posjedovanja četiri prekidačka elementa (MOSFET) koji snižavaju naprezanje opreme. Rad sa naizmjeničnim strujama omogućava upotrebu fizički manjih komponenti u odnosu na rad sa jednosmjernim strujama, stoga je jasna uloga invertora. Transformator je odgovoran za snižavanje amplitude napona dok ispravljач vraća jednosmjerne vrijednosti koje su zahtijevane na izlazu punionice za električne automobile [25].

Proces modelovanja fazno pomjerajućeg mostnog konvertora – PSFB se može podijeliti u dvije cjeline:

- Fazno pomjerajući mostni konvertor – PSFB
- Kontrolna petlja PSFB-a

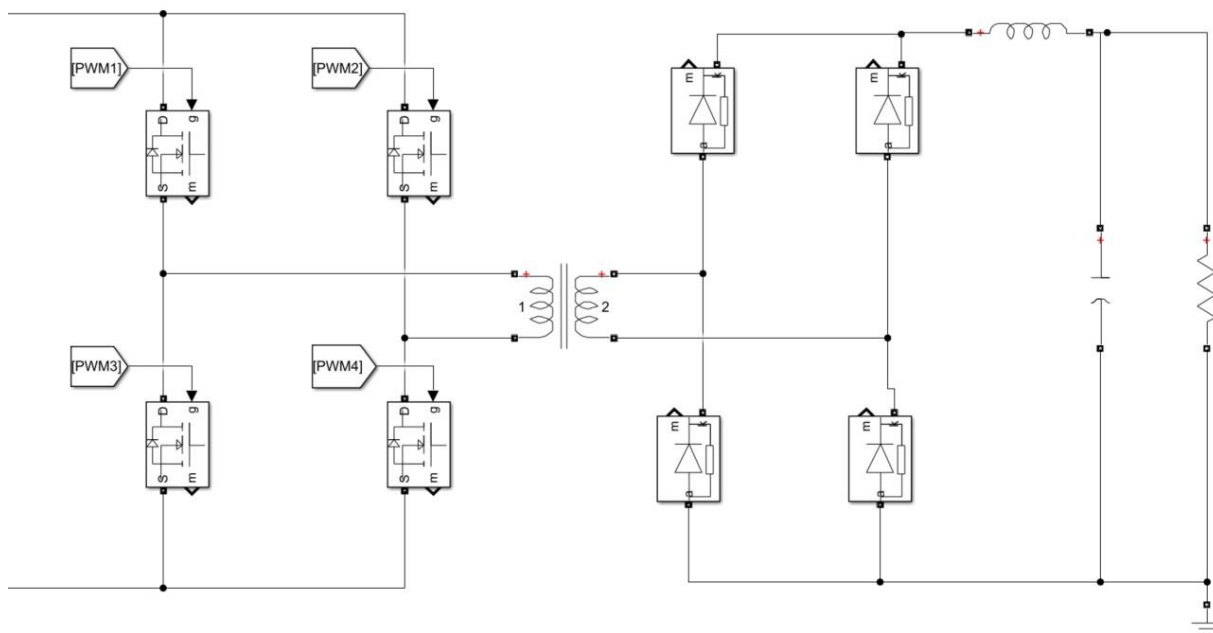
Za konfigurisanje odgovarajućih komponenti fazno pomjerajućeg mostnog konvertora neophodni su ulazni podaci koji predstavljaju osnov za proračun odgovarajućih vrijednosti tih komponenti:

Ulazni podaci:

- 1) Napon na primaru transformatora  $V_{in} = 400V$
- 2) Izlazni napon punionice  $V_{out} = 240V$
- 3) Izlazna struja punionice  $I_{out} = 16A$
- 4) Izlazna snaga punionice  $P_{out} = 3800W$
- 5) Prekidačka frekvencija  $f_{sw} = 100kHz$

#### 4.3.1. Modelovanje fazno pomjerajućeg mostnog konvertora – PSFB

Model fazno pomjerajućeg mostnog konvertora u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK je prikazan na slici 4.11.



*Slika 4.11 Simulacioni model fazno pomjerajućeg mostnog konvertora PSFB  
MATLAB/SIMULINK*

#### 4.3.1.1. Invertor

Invertor PSFB konvertora je modelovan uz pomoć prekidačkih uređaja (MOSFET). Podešena prekidačka frekvencija ovih elemenata je 100kHz što omogućava efikasan rad invertora i smanjenje gabarita.

#### 4.3.1.2. Linearni transformator

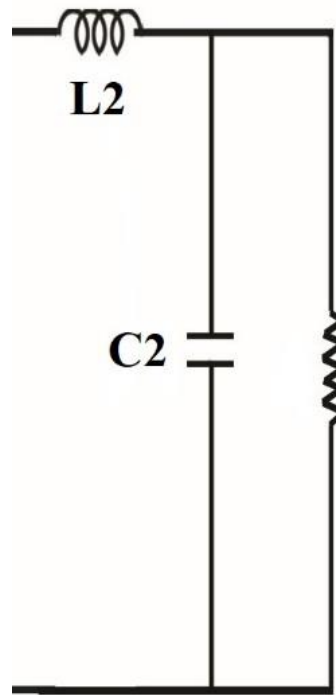
Linearni transformator ima ulogu spuštanja izlaznog napona i prilagođavanja željenoj vrijednosti na samom izlazu iz punionice za električne automobile. Linearni transformator je modelovan tako što su mu podešeni osnovni parametri na sledeće vrijednosti:  $S_n = 4000VA$ ,  $V_1 = 400V$ ,  $V_2 = 250V$ ,  $f_n = 100kHz$ , za potrebe modelovanja punionice za električne automobile snage 3.8kW.

#### 4.3.1.3. Ispravljač

Ispravljač je modelovan kao diodni most, čija je osnovna uloga ispravljanje napona na jednosmjernu vrijednost koja se zahtijeva na priključku baterije električnog automobila.

#### 4.3.1.4. Izlazni filter

Izlazni filter (slika 4.12) se sastoji od induktivnosti i kapacitivnosti, koje je potrebno proračunati na osnovu ulaznih podataka i na taj način modelovati date komponente.



Slika 4.12 Šematski prikaz filtra PSFB-a

4.3.1.4.1. Modelovanje induktivnosti  $L_2$

Proračun induktivnosti je od značaja kako bi varijacije izlazne struje bile svedene u zadovoljavajući opseg, što je neophodno za bezbjedno napajanje električnog automobila. Relacije na osnovu kojih se dolazi do vrijednosti za induktivnost su date u nastavku:

$$D = 0.5 \cdot \frac{V_{out}}{V_{in} \frac{N_s}{N_p}} = 0.42 \quad (4.8)$$

$$\Delta I = 0.2 \cdot I_{out} = 3.2A \quad (4.9)$$

$$V_L = V_{in} \frac{N_s}{N_p} - V_{out} = 10V \quad (4.10)$$

$$V_L = L_2 \frac{\Delta I_L}{DT_s} \quad (4.11)$$

$$L_2 = \frac{V_L DT_s}{\Delta I_L} = 15\mu H \quad (4.12)$$

gdje je:

$L_2$  – induktivnost

$\frac{N_s}{N_p}$  – prenosni odnos transformatora ( $\frac{250}{400}$ )

$\Delta I$  – vrijednost varijacija (kolebanja) izlazne struje

$D$  – koeficijent radnog ciklusa

$T_s$  – period uključenja-isključenja ( $\frac{1}{f_{sw}}$ )

Maksimalna dozvoljena vrijednost varijacije izlazne struje (ripple current  $\Delta I$ ) iznosi 20% izlazne vrijednosti struje  $I_{out}$ , dok se koeficijent radnog ciklusa  $D$  (duty cycle) dobija iz prethodno navedene relacije 4.8.

#### 4.3.1.4.2. Modelovanje kapacitivnosti $C_2$

Vrijednost izlazne kapacitivnosti zavisi od više različitih faktora, dobija se iz sledećih relacija:

$$\Delta V = 0.01 \cdot V_{out} = 2.4V \quad (4.13)$$

$$C_2 = \Delta I \frac{DT_s}{\Delta V} = 6.4\mu F \quad (4.14)$$

gdje je:

$C_2$  – kapacitivnost

$\Delta V$  – vrijednost varijacije (kolebanja) izlaznog napona

$\Delta I$  – vrijednost varijacije (kolebanja) izlazne struje

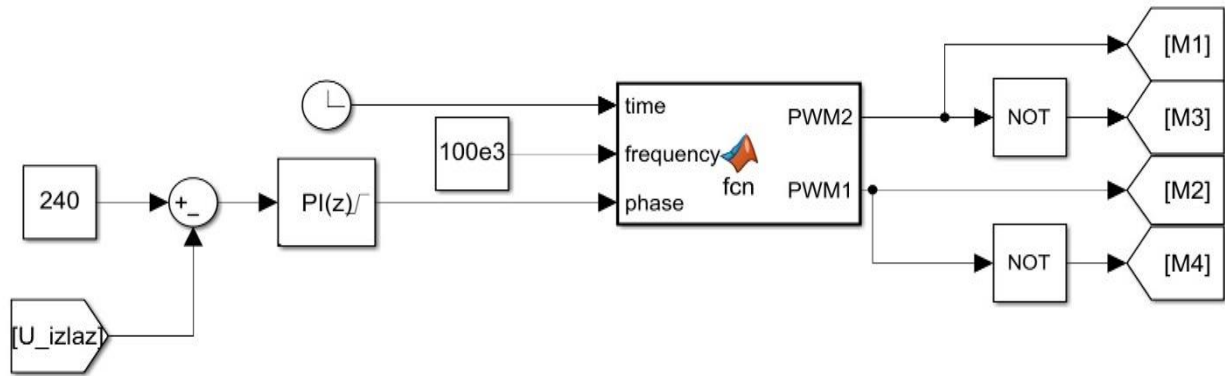
$D$  – koeficijent radnog ciklusa

$T_s$  – period uključenja-isključenja ( $\frac{1}{f_{sw}}$ )

Maksimalna dozvoljena vrijednost varijacije izlaznog napona (ripple voltage  $\Delta V$ ) iznosi 1% izlazne vrijednosti napona  $V_{out}$  4.13, dok se koeficijent radnog ciklusa  $D$  (duty cycle) dobija iz prethodno navedene relacije 4.8. Otpornost na izlazu punionice za električne automobile  $R = 15\Omega$  simulira baterijski sistem automobila koji se napaja jednosmjernim vrijednostima napona i struje i to sledećih vrijednosti: 240V i 16A.

#### 4.3.2. Modelovanje kontrolne petlje PSFB-a

Kontrolna petlja PSFB-a (fazno pomjerajućeg mostnog konvertora) (slika 4.13), ima jedinstven zadatak, da postigne preciznu predaju signala MOSFET-ovima i njihovo uspješno kontrolisanje kako bi se na izlazu punionice za električne automobile postigao željeni napon.



Slika 4.13 Simulacioni model kontrolne petlje PSFB-a (fazno pomjerajućeg mostnog konvertora) MATLAB/SIMULINK

Naime, definisana referentna vrijednost izlaznog napona na punionici električnog automobila jeste 240V, ta zadata veličina se upoređuje sa stvarnom vrijednosti napona na izlazu punionice za električne automobile. Odstupanja se šalju u PI kontroler koji uspostavlja određeni fazni pomjeraj i šalje ga na jedan od ulaza MATLAB funkcije pod nazivom fazni pomjeraj (phase). Preostala dva ulaza ove funkcije su protok vremena (time-clock) i prekidačka frekvencija (frequency -  $f_{sw}$ ).

MATLAB funkcija obrađuje dobijene ulazne podatke i na svom izlazu daje dva signala PWM1 i PWM2. Logika MATLAB funkcije je data u nastavku:

```
function [PWM2, PWM1] = fcn(time, frequency, phase)

Tswitching = 1/frequency;
PWM1 = 0;
PWM2 = 0;
y1 = mod(time, Tswitching);
if y1 < Tswitching/2
PWM1 = 1;
end
t_phi = Tswitching*phase/360;
y2 = mod(time+t_phi, Tswitching);
```

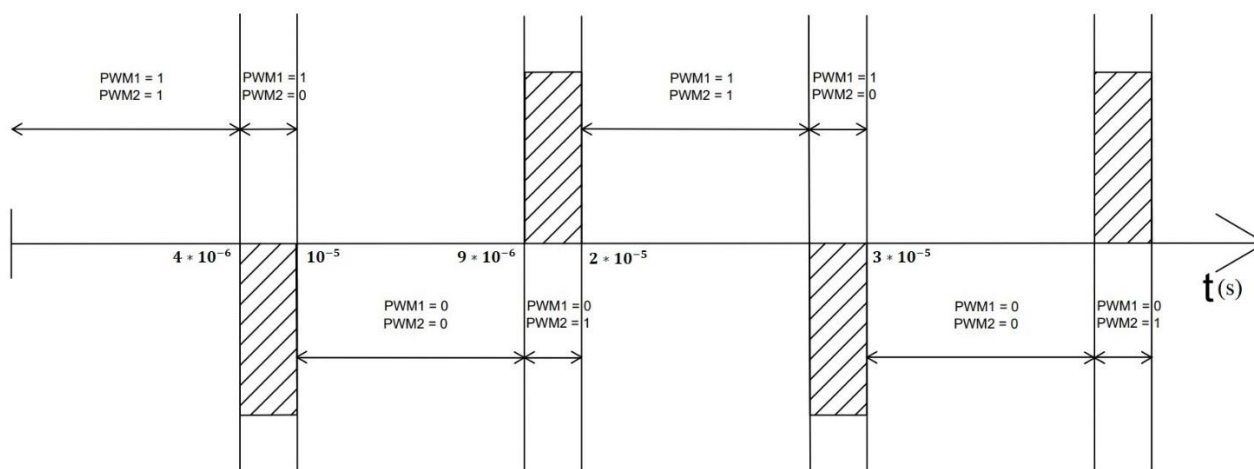
```

if y2 < Tswitching/2
PWM2 = 1;
end

end

```

Osnovna logika ove funkcije jeste kontrolabilnost samog invertora (MOSFET-ova) i regulacija napona na ulazu u linearni transformator. Izlazni signal PWM1 uz pomoć logičkih kola ima mogućnost kontrole MOSFET-ova M2 i M4, dok izlazni signal PWM2 ima mogućnost kontrole MOSFET-ova M1 i M3. Za vrijeme prve poluperiode prekidačke frekvencije 100kHz vrijednost na izlazu PWM1 signala jeste 1, dok za vrijeme druge poluperiode prekidačke frekvencije jeste 0. Izlazni signal PWM2 zavisi od faznog stava, odnosno od vrijednosti  $t_{phi}$ , koja se dobija uz pomoć faznog pomjeraja, a koja iz PI kontrolera stiže na jedan od ulaza zadate MATLAB funkcije. Upravo ovaj fazni stav pravi razliku i dovodi izlazne signale PWM1 i PWM2 u opoziciju što omogućava jednovremeno uključivanje MOSFET-ova M1 i M4 ili drugi par MOSFET-ova M2 i M3, kada počinje provođenje struje kroz primar linearnog transformatora, kao što se vidi na slici 4.14.



*Slika 4.14 Dijagram prekidačkih kontrolnih signala invertorskog mosta PSFB-a*

Na osnovu poređenja referentne vrijednosti napona i stvarne vrijednosti napona na izlazu punionice za električne automobile PI kontroler određuje dinamiku djelovanja i vrijednost faznog pomjeraja koji šalje funkciji, od čega zavisi kontrola rada MOSFET-ova i regulisanje napona posredstvom impulsno širinske modulacije.

## 5. SIMULACIJA UTICAJA ATMOSFERSKIH PRENAPONA NA PUNIONICE ZA ELEKTRIČNA VOZILA

U ovom poglavlju izvršene su simulacije uticaja atmosferskih prenapona na komponente punionica za električna vozila. Pri tome su korišćeni modeli prenaponskih talasa i punionica prikazani u prethodnim poglavljima.

Prenapon kombinovanog generatora atmosferskog pražnjenja u NN mreži nastupa u trenutku 5ms, prekidač unutar simulacije generatora kombinovanog prenaponskog talasa je podešen sa vremenskim zatezanjem od 5ms, radi preglednijeg očitavanja podataka.

Prema otpornosti u odnosu na sve vrste udarnih prenaponskih talasa (nezavisno od porijekla), tj. prema dielektričnoj čvrstoći izolacije, električna oprema i uređaji u električnim instalacijama se svrstavaju u četiri prenaponske kategorije. Za svaku od četiri kategorije je određen maksimalni udarni napon oblika  $1.2/50\mu s$  koji oprema, odnosno uređaji mogu da podnesu. U tabeli II je za svaku od usvojenih prenaponskih kategorija dat maksimalni udarni podnosivi napon koji važi za linijski radni napon od 400V [26].

*Tabela 5.1 Podnosivi udarni napon u zavisnosti od prenaponske kategorije [26]*

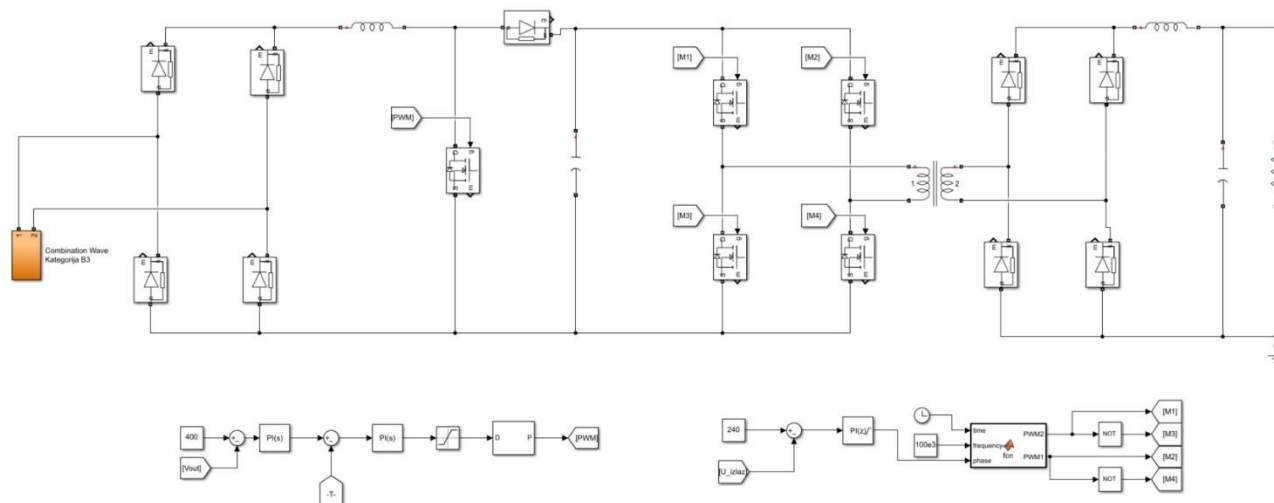
Prenaponska kategorija	I	II	III	IV
Podnosivi udarni napon (V)	1500	2500	4000	6000

Uporednom analizom rezultata koji su dobijeni mjerenjem napona na diodnom mostu u toku trajanja simulacija i podnosivih udarnih napona na osnovu IEC standarda IEC 60664 [26], postoji očigledna opasnost od mogućeg proboja (preskoka) izolacije na diodama i neželjenih posledica.

### 5.1. Kombinovani prenaponski talas

U cilju analize uticaja atmosferskog pražnjenja na punionice za električna vozila u NN mreži, kreiran je model MATLAB/SIMULINK kojim se simulira pojava prenaponskog talasa (kombinovanog talasa), neposredno na priključku punionice za električna vozila. Model generatora (slika 3.5) je priključen na ulazu modela punionice za električne automobile (slika 5.1) i generiše kombinovani prenaponski talas.





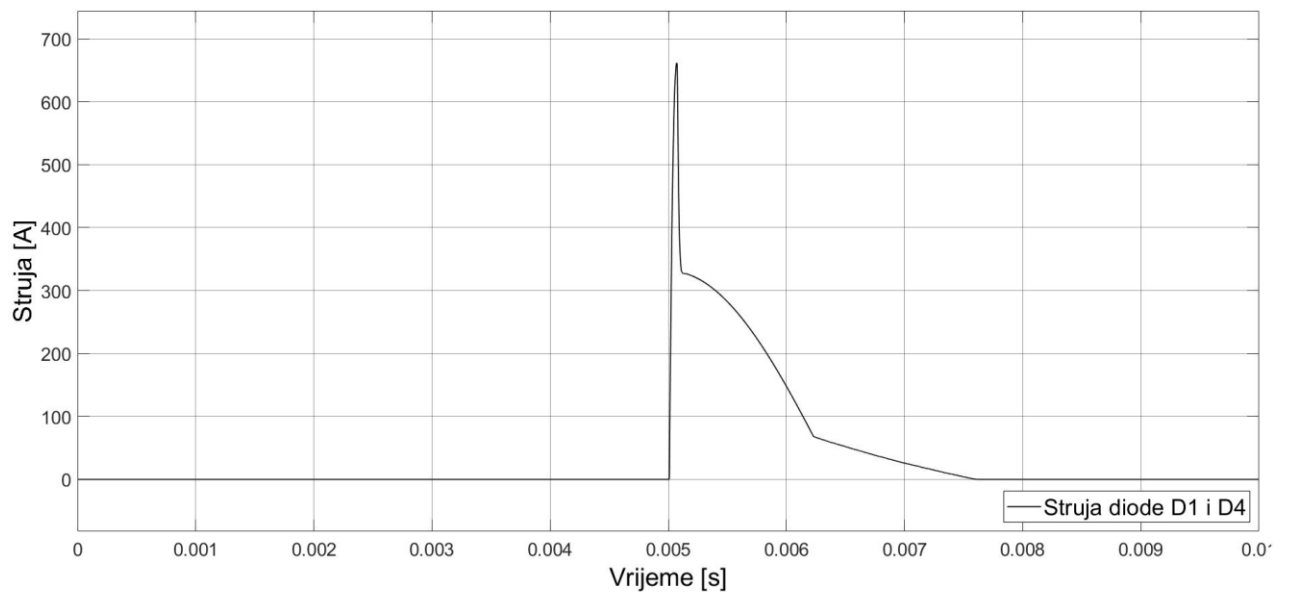
Slika 5.1 Simulacija punionice za električne automobile sa priključenim generatorom kombinovanog prenaponskog talasa

Mjerenje naponskih i strujnih veličina se vrši istovremeno na različitim pozicijama/komponentama kako bi se dobila potpuna analiza i uočio potencijalni rizik po opremu ili neposredne rukovaoce punionicom za električna vozila. Na osnovu analize velikog broja sprovedenih mjerenja dolazi se do sledećih zaključaka:

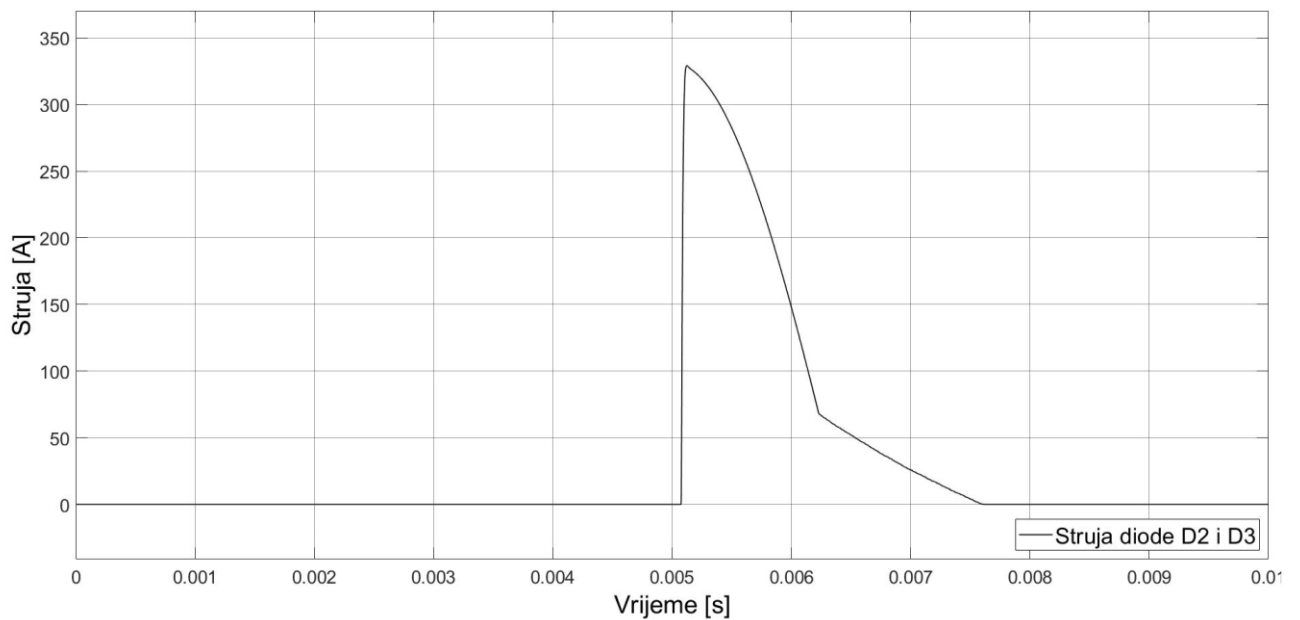
- Dolazi do istovremenog provođenja dioda diodnog mostnog ispravljača
- Pojavljuju se izuzetno visoke vrijednosti amplitude struje kroz elemente punionice
- Pojavljuju se izuzetno visoke vrijednosti amplitude napona na elementima punionice

### 5.1.1. Istovremeno provođenje dioda diodnog mostnog ispravljača

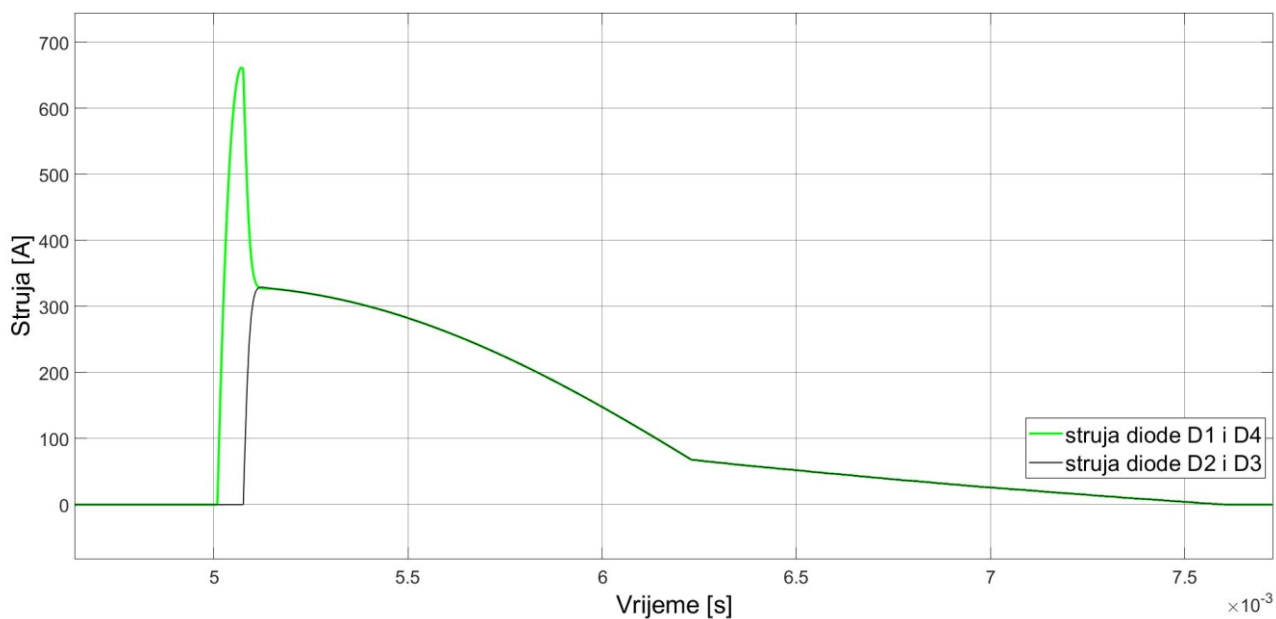
Nakon izvršenih mjerenja i analize kritičnih tačaka u sistemu punionice za električne automobile, pored analiziranih tačaka gdje su vrijednosti udarnog napona veoma visoke, uočen je simptom nepravilnog funkcionisanja punionice za električne automobile. Prenaponski talas se injektira u trenutku 5.0ms. Naime, diodni mostni ispravljač, 9  $\mu$ s nakon udarnog napona, u trenutku 5.009ms počinje da provodi električnu struju i to kroz diode D1 i D4 (slika 5.2), što je potpuno očekivano. Međutim, nakon 66  $\mu$ s počinju da provode i diode D2 i D3 (slika 5.3), odnosno u tom trenutku provode sve četiri diode diodnog ispravljačkog mosta (slika 5.4). Intenzitet struje kroz diode se smanjuje opadanjem intenziteta prenaponskog talasa i dostiže nultu vrijednost u trenutku 7.6ms.



*Slika 5.2 Talasni oblik struje kroz diode D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača*

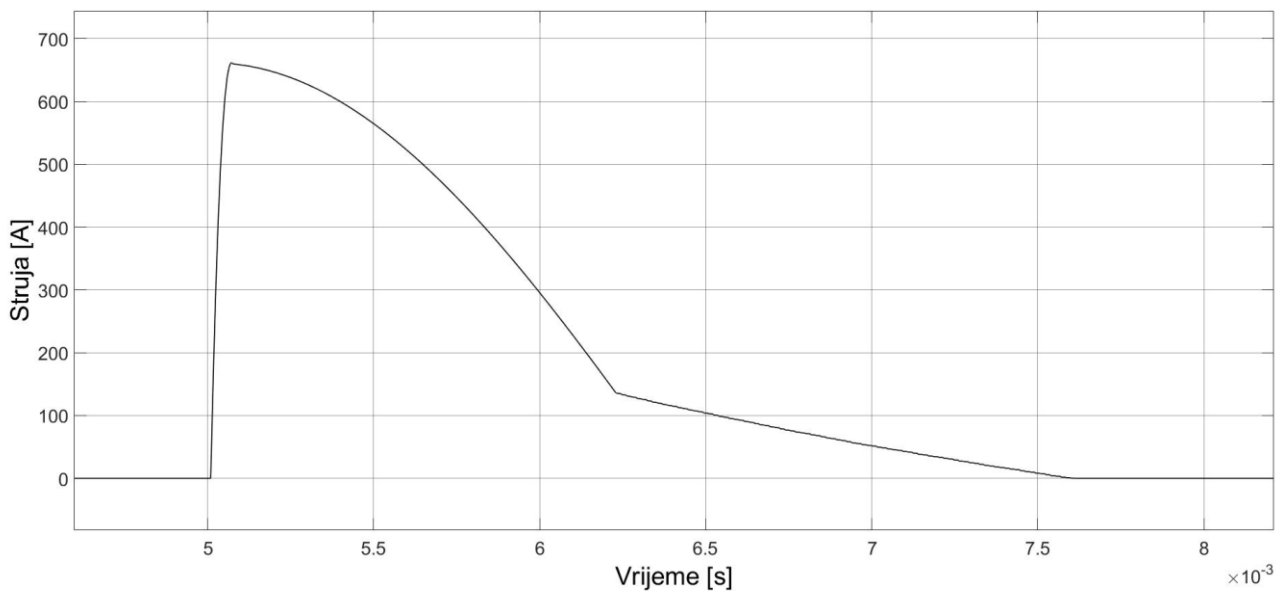


*Slika 5.3 Talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača*

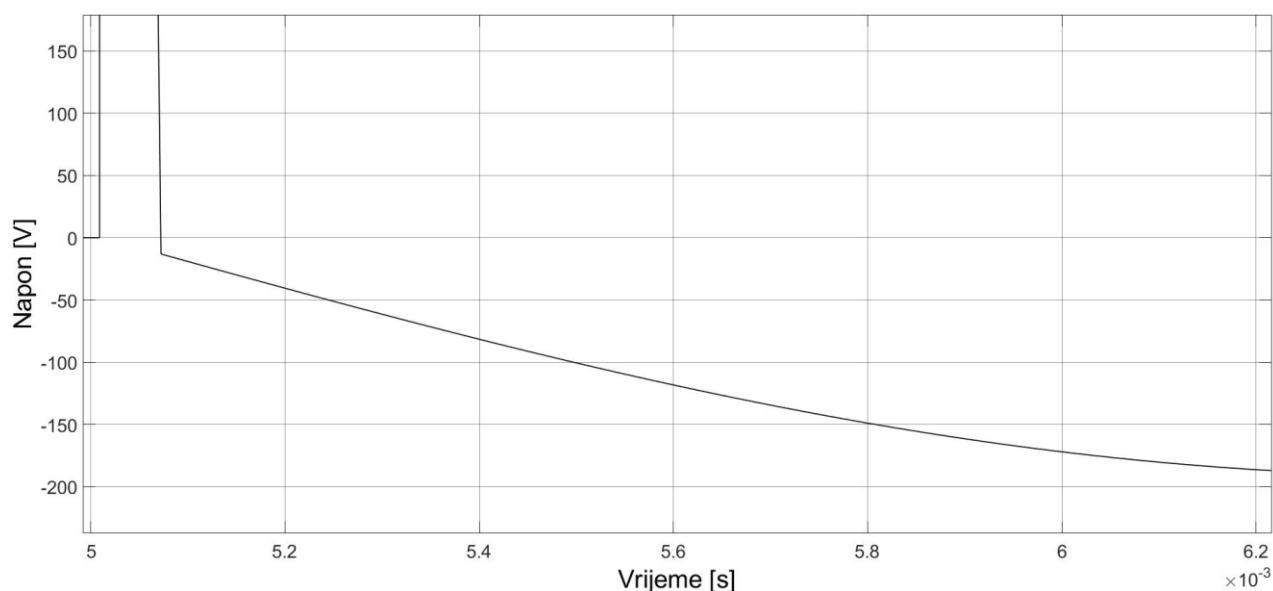


*Slika 5.4 Talasni oblik struje kroz sve četiri diode diodnog mostnog ispravljača*

Uzrok nepravilnog funkcionisanja diodnog mostnog ispravljača se može pronaći analizom induktivnog elementa (kalema) na izlazu diodnog mostnog ispravljača. Usljed izuzetno brze promjene intenziteta struje kroz induktivni element (kalem) (slika 5.5), dolazi do indukovanja negativnog napona na kalem (slika 5.6) koji omogućava provodno stanje dioda D2 i D3.

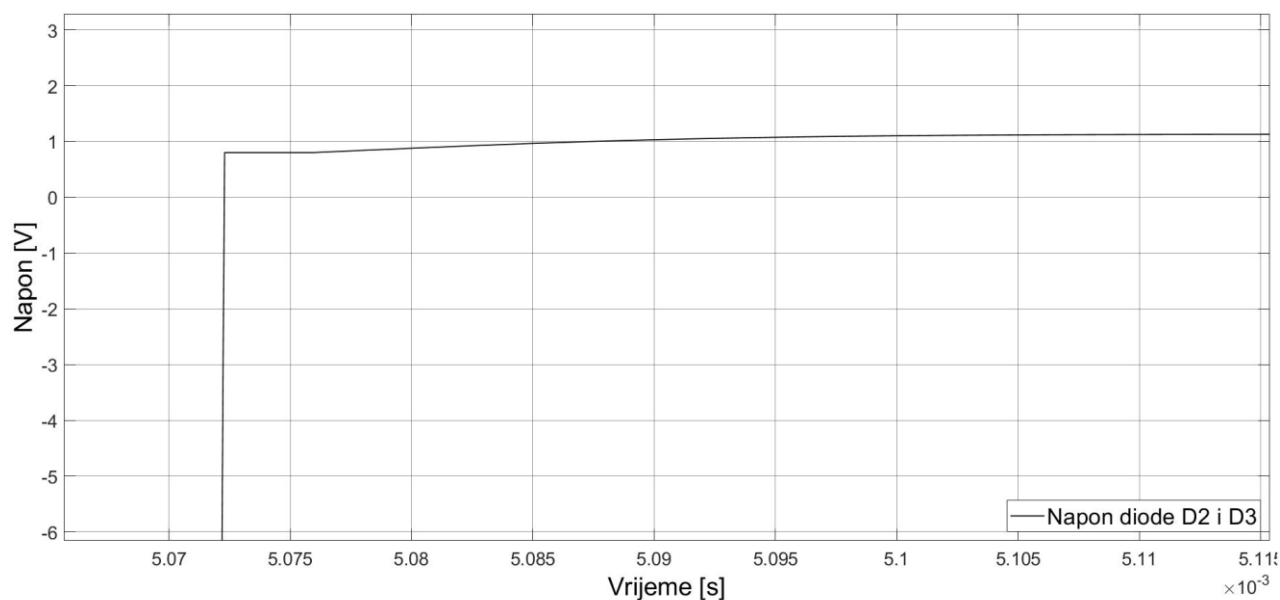


*Slika 5.5 Talasni oblik struje kroz induktivni element (kalem) APFC-a*



*Slika 5.6 Talasni oblik napona na induktivnom elementu (kalemu) APFC-a*

Diode D2 i D3 počinju da provode 72  $\mu$ s nakon pojave udarnog naponskog talasa, odnosno u trenutku 5.072ms. U tom trenutku napon na kalemu presijeca nultu vrijednost i prelazi u negativni polaritet, dok u tom istom trenutku napon na diodama D2 i D3 (slika 5.7) uzrokovan negativnim naponom na kalemu presijeca nultu vrijednost i prelazi u pozitivni polaritet. Napon na ovim diodama dostiže prag provođenja i omogućava diodama da pređu u provodno stanje.



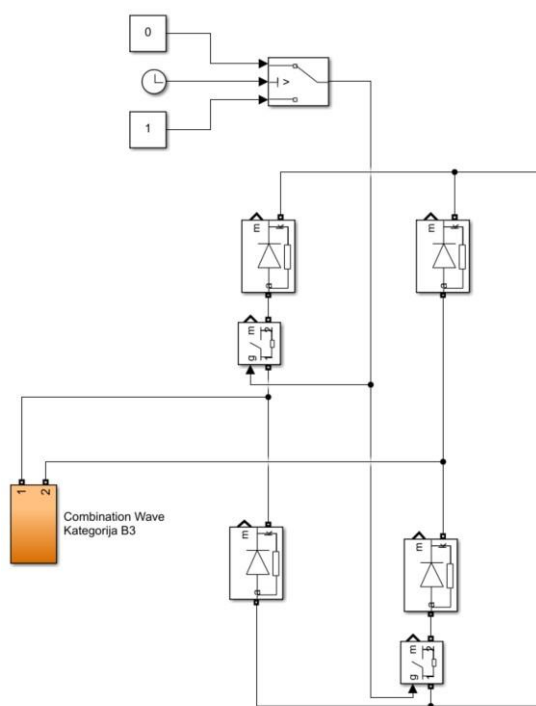
*Slika 5.7 Talasni oblik napona na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača*

Pojava gdje sve četiri diode diodnog mostnog ispravljača provode električnu struju može negativno da se odrazi na kontrolni mehanizam punjenja baterije električnog automobila ili da dovede do oštećenja na samoj punionici za električne automobile.

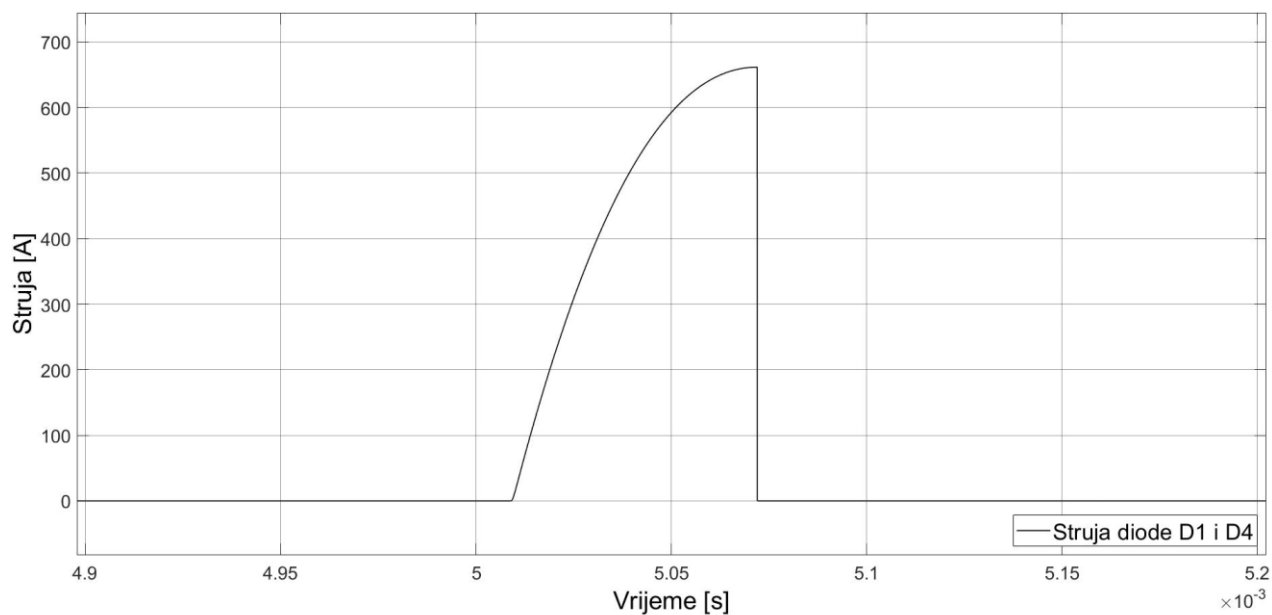
### 5.1.2. Izuzetno visoke vrijednosti intenziteta struje kroz elemente punionice

Uticao atmosferskog pražnjenja na punionice za električne automobile modelovan kombinovanim prenaponskim talasom ima negativan uticaj pojave visokih vrijednosti intenziteta struje kroz diodni mostni ispravljač. Naime, uticaj generatora kombinovanog prenaponskog talasa dovodi do pojave struje u diodnom mostnom ispravljaču. Tokom trajanja pomenutog atmosferskog pražnjenja intenzitet struja koja protiče kroz diode D1 i D4 dostiže kritične vrijednosti, amplituda talasnog oblika struje kroz diode D1 i D4 iznosi 670A [27]. Izmjerena vrijednost amplitude struje kroz diodni par prevazilazi više puta maksimalne dozvoljene vrijednosti intenziteta struje kroz diode koje se koriste za konstruisanje AC/DC ispravljača snage ~4kW [27].

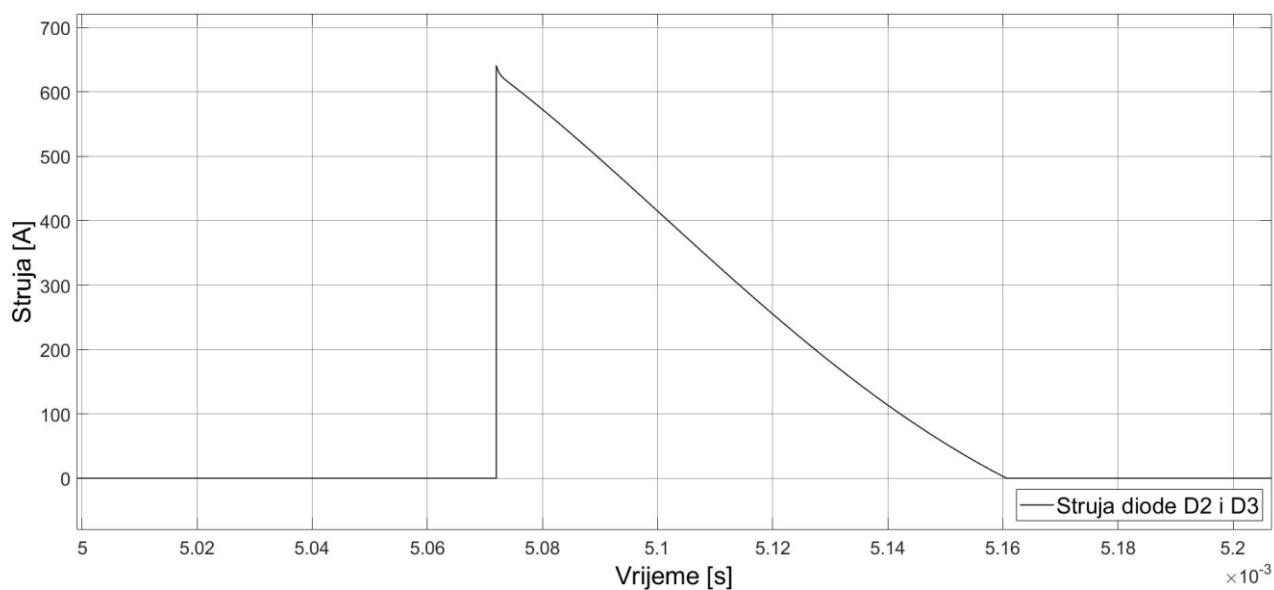
Ovakva pojava upućuje na potrebu simulacije kvara na diodama D1 i D4, što se postiže postavljanjem idealnog prekidača na red sa diodama D1 i D4 (slika 5.8.) U trenutku kada struja dostiže maksimalnu vrijednost (5.072ms) dolazi do okidanja prekidača i simulacije prekida rada dioda D1 i D4. U tom trenutku struja kroz diode D1 i D4 pada na nultu vrijednost (slika 5.9), dok struja kroz diode D2 i D3 (slika 5.10), naglo poraste i diode počnu da provode istim intenzitetom kojim su provodile diode D1 i D4.



*Slika 5.8 Simulacioni model prekidača struje kroz diode D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača*



*Slika 5.9 Talasni oblik struje kroz diode D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije prekida rada tih dioda*

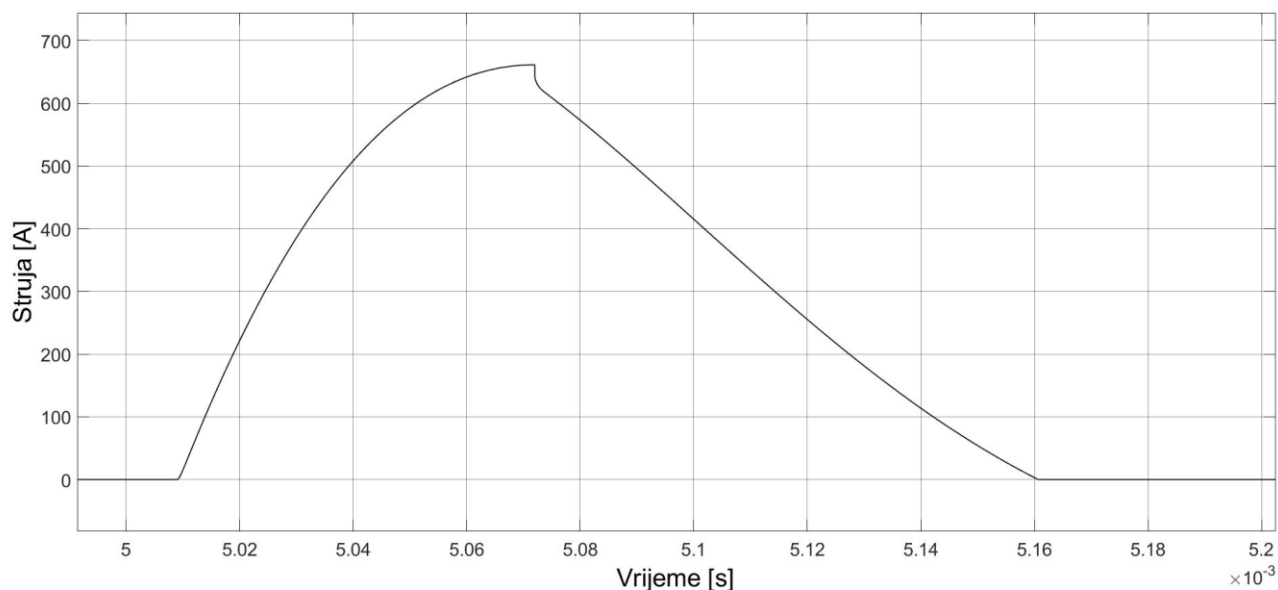


*Slika 5.10 Talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije prekida rada dioda D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača*

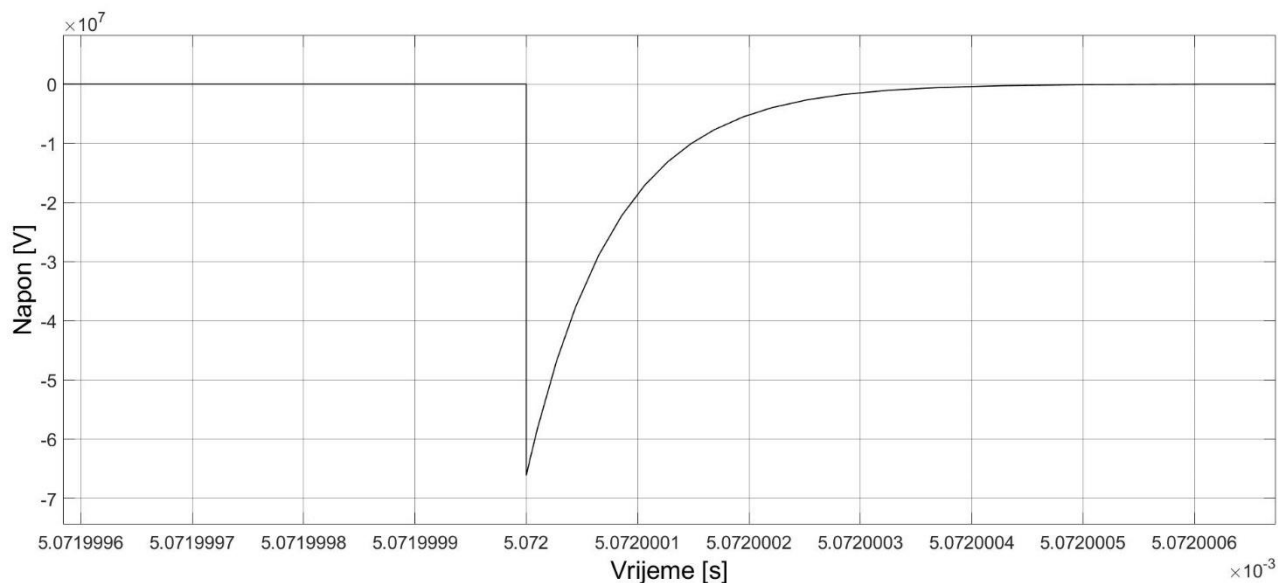
Na osnovu dobijenih rezultata može se izvesti zaključak da bi odmah nakon pregorijevanja i prekida rada dioda D1 i D4 došlo do oštećenja i prekida rada dioda D2 i D3 što bi uzrokovalo potpuno oštećenje diodnog mostnog ispravljača, a potencijalno uzrokovalo i oštećenje ostalih komponenti punionice za električne automobile.

Međutim, u trenutku 5.072ms kada se desi prekid rada dioda D1 i D4 dolazi do pojave dodatnih neželjenih stanja unutar punionice za električne automobile. Zbog nagle promjene intenziteta struje kroz induktivni element (kalem) APFC-a (automatskog ispravljača faktora

snage) (slika 5.11), indukuje se napon negativnog polariteta koji dostiže izuzetno visoke vrijednosti (slika 5.12).



*Slika 5.11 Talasni oblik struje kroz induktivni element (kalem) APFC-a tokom simulacije prekida rada dioda D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača*

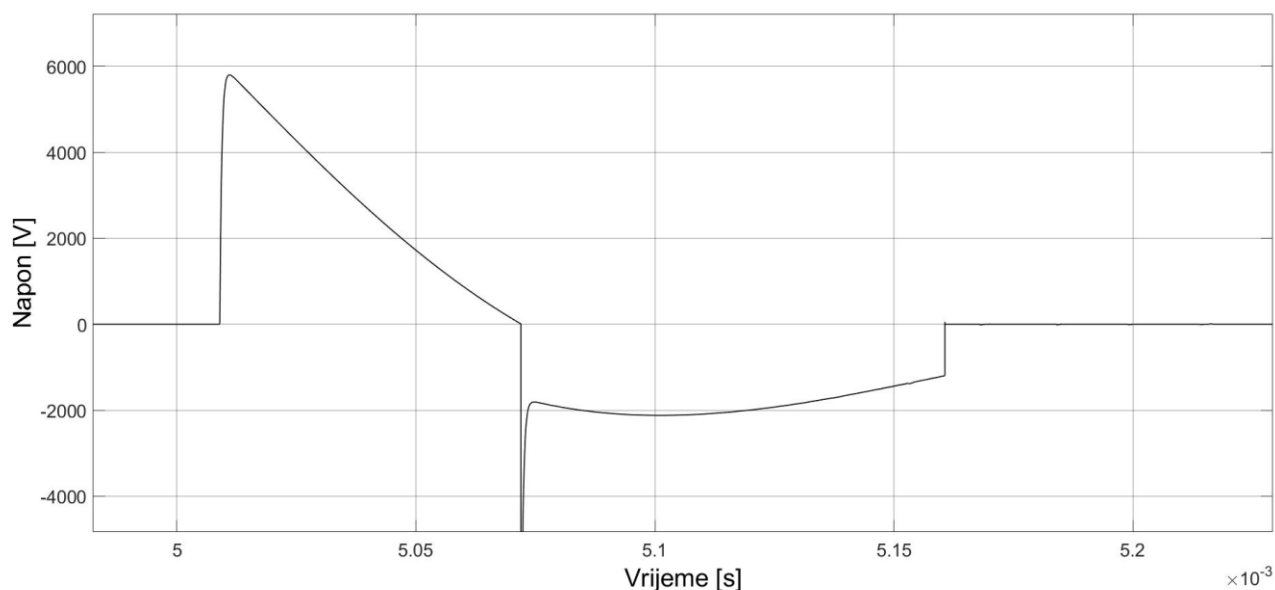


*Slika 5.12 Talasni oblik napona kroz induktivni element (kalem) APFC-a tokom simulacije prekida rada dioda D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača*

Induktivni element ima tendenciju da zadrži stabilno (pređašnje) stanje, nagla promjena intenziteta struje uslovljava pojavu negativnog napona koji dostiže vrijednost od  $\sim 67$  MV. Ova vrijednost napona gotovo sigurno uzrokuje proboj izolacije i trajna oštećenja djelova punionice za električne automobile, potencijalno i cijele punionice za električne automobile. U slučaju da je u

tom trenutku automobil priključen na punionicu moguće je očekivati i oštećenje sistema za punjenje električnog automobila ili baterije samog automobila.

Međutim, trajanje ovakvog prenaponskog talasa je veoma kratko  $\sim 0.4$  piko sekunde, nakon čega se intenzitet napona ponovo ustabilio na pređašnju vrijednost (slika 5.13). Sa slike 5.13 se može uočiti da napon na početku simulacije prati očekivani naponski talas atmosferskog pražnjenja, dok u trenutku 5.072ms kada se simulira prekid (oštećenje) dioda D1 i D4 dolazi do kratkotrajne pojave indukovano napona ogromnih vrijednosti. Nakon samo 0.4 piko sekunde napon naglo pada na vrijednost  $-2000\text{V}$  i umjerenim intenzitetom dostiže nultu vrijednost.



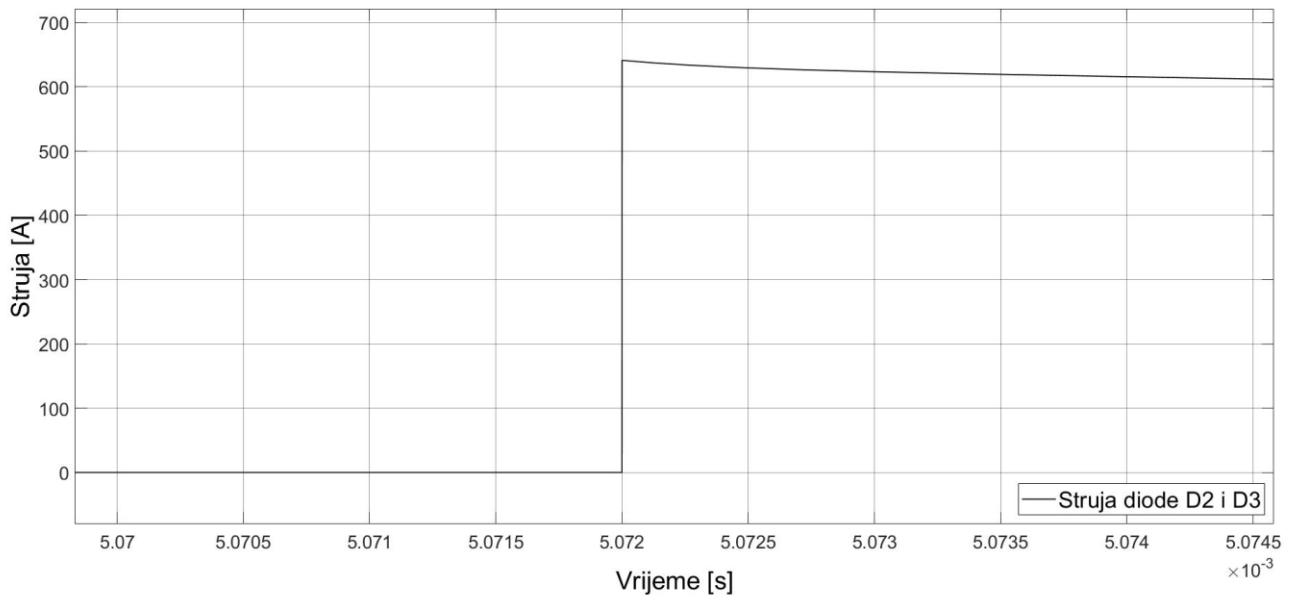
*Slika 5.13 Talasni oblik napona na induktivnom elementu (kalemu) APFC-a tokom simulacije prekida rada dioda D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača*

Induktivna svojstva kalema su nedvosmisleno uzrok nastanka ovog prenaponskog udara. Na slici 5.11 se jasno uočava kratki pad intenziteta struje u trenutku simulacije prekida rada dioda D1 i D4, a zatim normalni protok struje kroz kalem. Ovakva pojava je uslovljena induktivnošću, dok negativni naponski udar automatski omogućava provođenje dioda D2 i D3 u trenutku simulacije prekida (5.072ms) (slika 5.14) koje preuzimaju funkciju dioda D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača za potrebe održanja kontinuiteta struje kroz induktivni element (kalem) APFC-a. Stoga struja na ulazu diodnog mostnog ispravljača mijenja smjer protoka ali zadržava intenzitet što se može vidjeti na slici 5.15. Zbog intenziteta struje i brzine promjene potpuno je očekivan ispad (pregorijevanje) dioda D2 i D3 kao što je već prethodno navedeno.

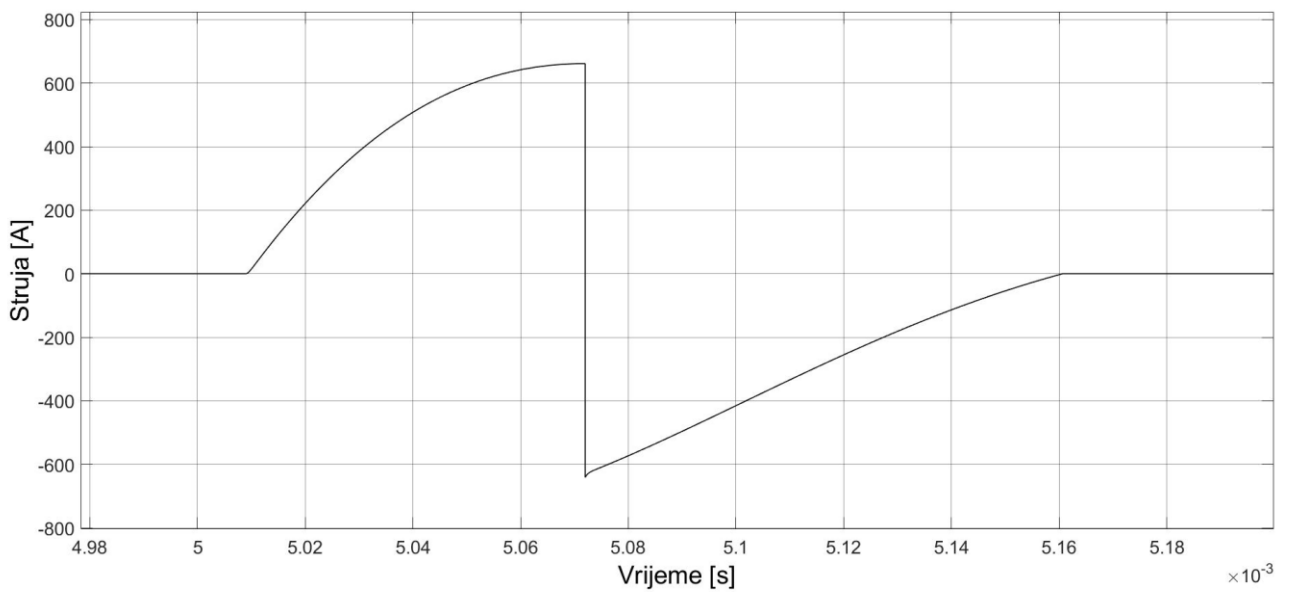
Izvršena analiza prekida (pregorijevanja) dioda D1 i D4 upućuje na kaskadno oštećenje svih elemenata diodnog mostnog ispravljača, izolacije induktivnog elementa (kalema) APFC-a, a potencijalno uzrokuje dalja oštećenja i nepravilan rad punionice za električne automoblie. U



krajnjem slučaju, ovakav efekat bi mogao da se odrazi na rad samog kontrolnog mehanizma punjenja električnog automobila i na ispravnost baterije automobila.



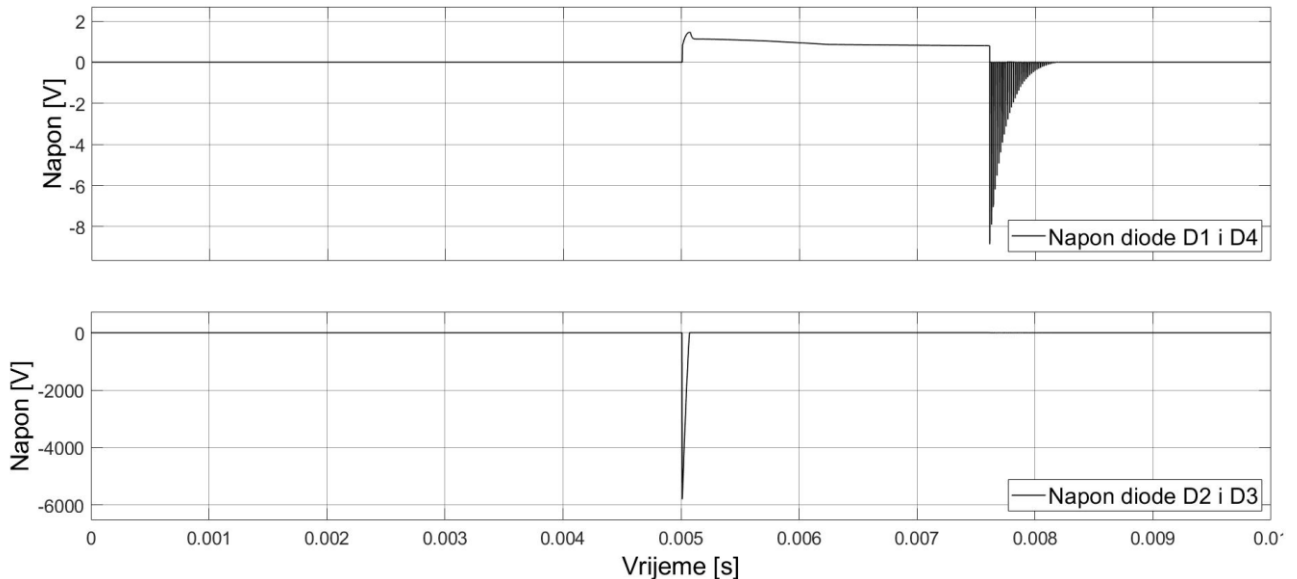
*Slika 5.14 Talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije prekida rada dioda D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača*



*Slika 5.15 Talasni oblik struje na ulazu u punionicu za električne automobile tokom simulacije prekida rada dioda D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača*

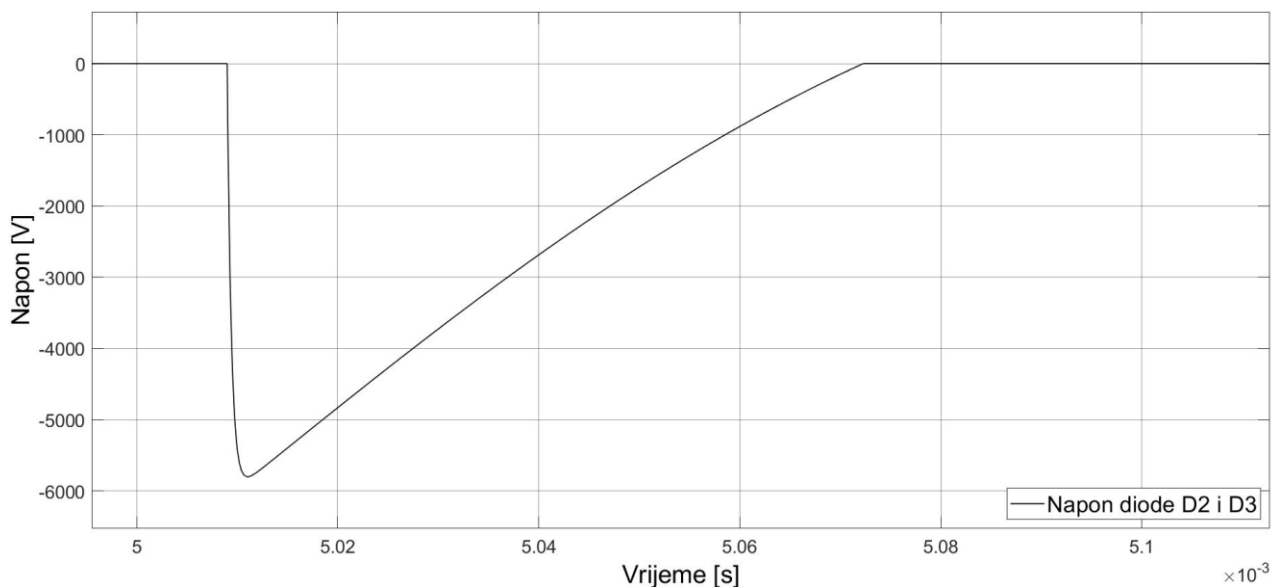
### 5.1.3. Izuzetno visoke vrijednosti amplitude napona na elementima punionice

Napon sve četiri diode diodnog mostnog ispravljača na ulazu punionice za električne automobile je prikazan na slici 5.16. Sa slike se jasno uočava da je naponski oblik na diodama D1 i D4 identičan, kao i na diodama D2 i D3.



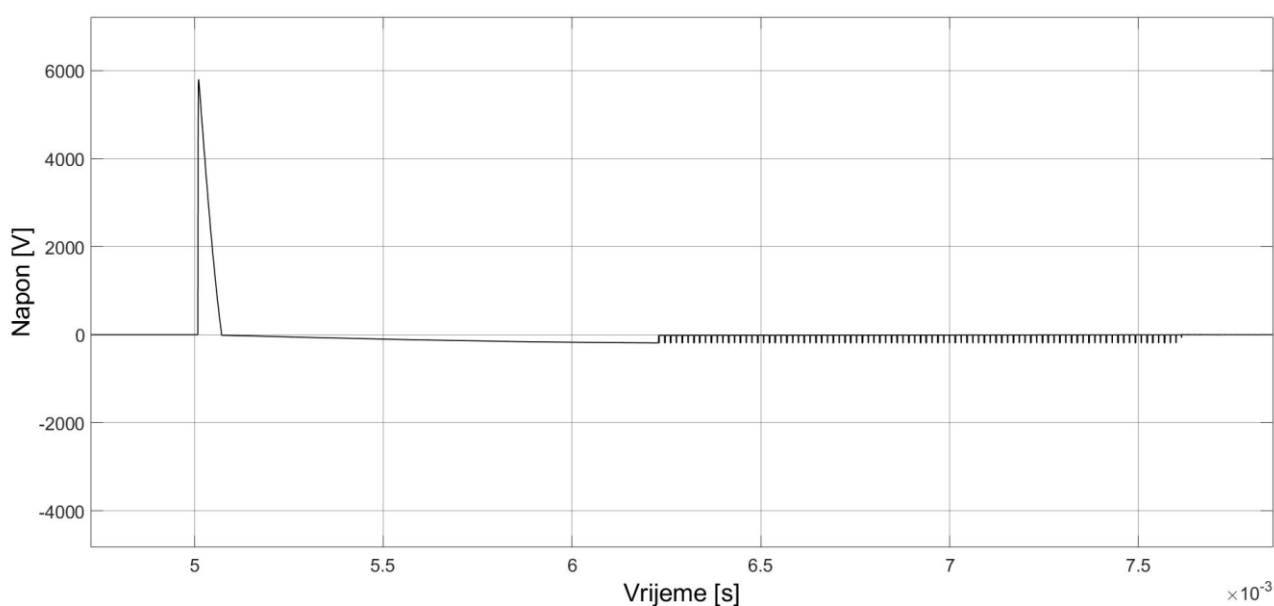
Slika 5.16 Talasni oblik napona na diodama diodnog mostnog ispravljača

Napon koji se javlja na diodama D2 i D3, a ujedno i na izlazu iz diodnog mostnog ispravljača prevazilazi dozvoljene maksimalne vrijednosti napona i može da dovede do preskoka (proboja) izolacije ili sagorijevanja diode. U slučaju proboja izolacije, dolazi do oštećenja punionice, trajnog kvara, a prateće finansijske posledice mogu biti u rangu same punionice za električna vozila ukoliko se prenaponski talas prenese na ostale elemente unutar uređaja. Napon koji se javlja na diodama D2 i D3 dostiže vrijednost od 5750V (slika 5.17).



Slika 5.17. Talasni oblik napona na diodama D2 i D3

Pored izuzetno visoke vrijednosti napona koji se javlja na diodama diodnog mostnog ispravljača, analizom dobijenih podataka se uočavaju i potencijalni problemi prenaponskog udara na induktivni element punionice električnih automobila. Naponski udarni napon koji je izmjerjen na diodama D2 i D3 u vrijednosti od 5750V prenosi se i na induktivni element (kalem) na izlazu diodnog mostnog ispravljača (slika 5.18), što predstavlja još jednu kritičnu tačku punionice za električne automobile prilikom pojave prenaponskog talasa. Potencijalni proboj (preskok) izolacije na ovom elementu može da dovede do kaskadnog proboja ili oštećenja ostalih elemenata punionice za električne automobile, što zahtjeva dodatnu simulaciju i analizu, koja će biti predmet istraživanja u nastavku rada.



*Slika 5.18 Talasni oblik napona na induktivnom elementu (kalemu) APFC-a*

#### 5.1.3.1. Simulacija proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3

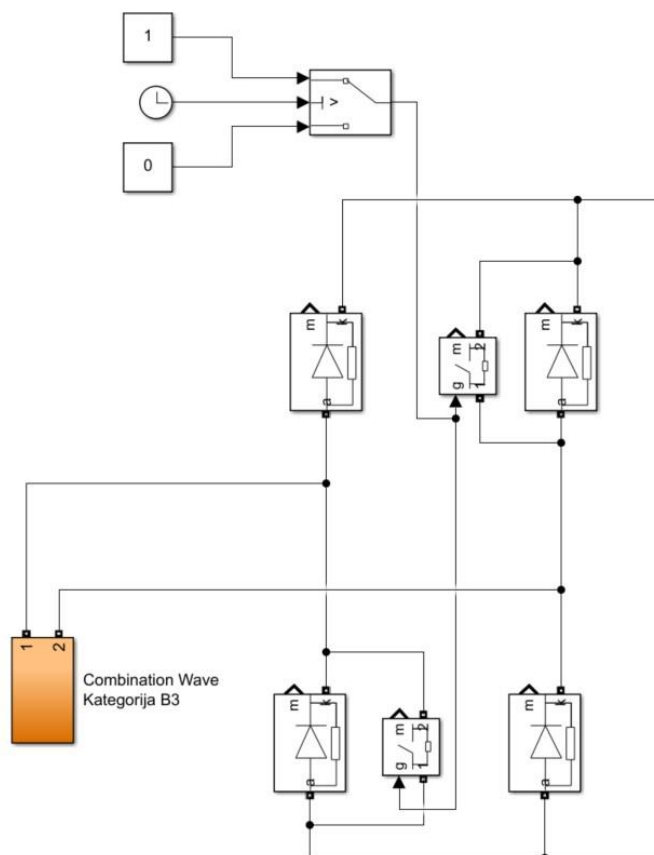
Usljed visoke vrijednosti napona od 5750V (slika 5.17) na diodama D2 i D3 postoji visok rizik od pojave proboja/preskoka izolacije na tom elementu punionice za električne automobile. Elementi punionice za električne automobile pri linijskom radnom naponu 0.4kV se svrstavaju u II, rijetko III prenaponsku kategoriju podnosivog udarnog napona čiji maksimalni dozvoljeni podnosivi udarni napon dostiže 4000V, a nerijetko i dosta niže vrijednosti amplitude naponskog udarnog talasa [28, 29]. Stoga, je neophodno izvršiti simulaciju proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača.

Proboj/preskok izolacije u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK je moguće izvršiti uz pomoć idealnog prekidača. Stoga je neophodno da se koristi idealni prekidač koji funkcioniše

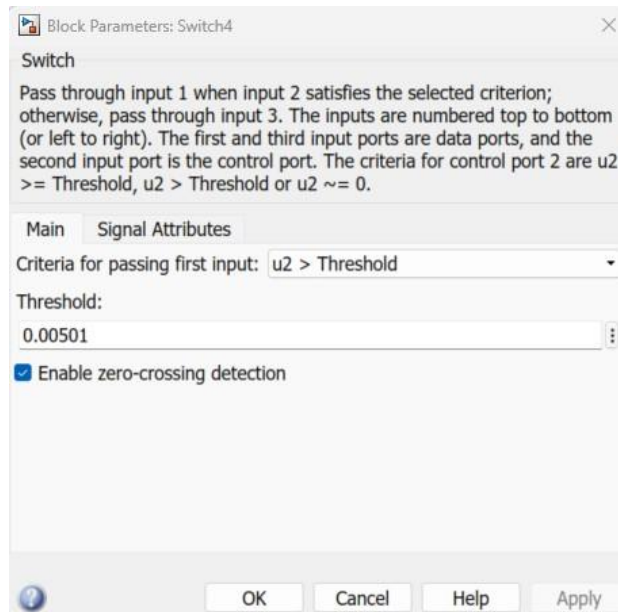
na osnovu binarnog signala koji stiže na njegov ulaz, kao što je izvršeno i u slučaju simulacije prekida dioda D1 i D4.

Na slici 5.19 je prikazan simulacioni model diodnog ispravljača u slučaju simulacije proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 na diodnom mostnom ispravljaču. Binarni signal koji se šalje na ulaz idealnog prekidača se formira uz pomoć kontrolnog prekidača, gdje se na osnovu više ulaznih signala formira izlazni signal u obliku logičke nule ili jedinice. Prvi ulaz kontrolnog prekidača je logička jedinica dok je treći ulaz logička nula. Na drugi ulaz je dovedeno mjerenje vremena („clock“) koji zapravo predstavlja poredbeni signal („u2“). Ukoliko je taj ulazni signal „u2“ veći od zadate vrijednosti „Threshold“ na izlazu će se formirati vrijednost prvog ulaza, u suprotnom na izlazu će se pojaviti vrijednost sa trećeg ulaza kontrolnog prekidača (slika 5.20).

Idealni prekidač funkcioniše tako što radi u otvorenom režimu ukoliko na njegov ulaz stiže nula, odnosno u zatvorenom režimu ukoliko na njegov ulaz stiže logička jedinica. Za potrebe simulacije proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača odabran je trenutak 5.01ms simulacije (odabrani trenutak predstavlja vrijeme kada napon udarnog naponskog talasa dostiže maksimalnu vrijednost 5.750V).

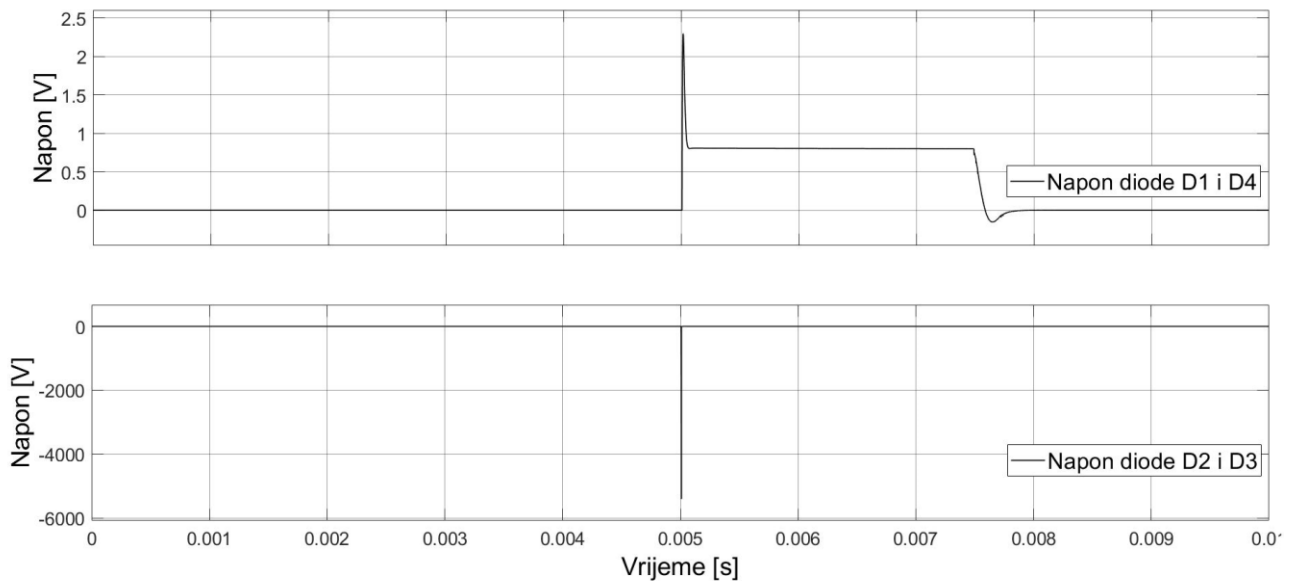


Slika 5.19 Simulacioni model proboja/preskoka izolacije dioda D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača



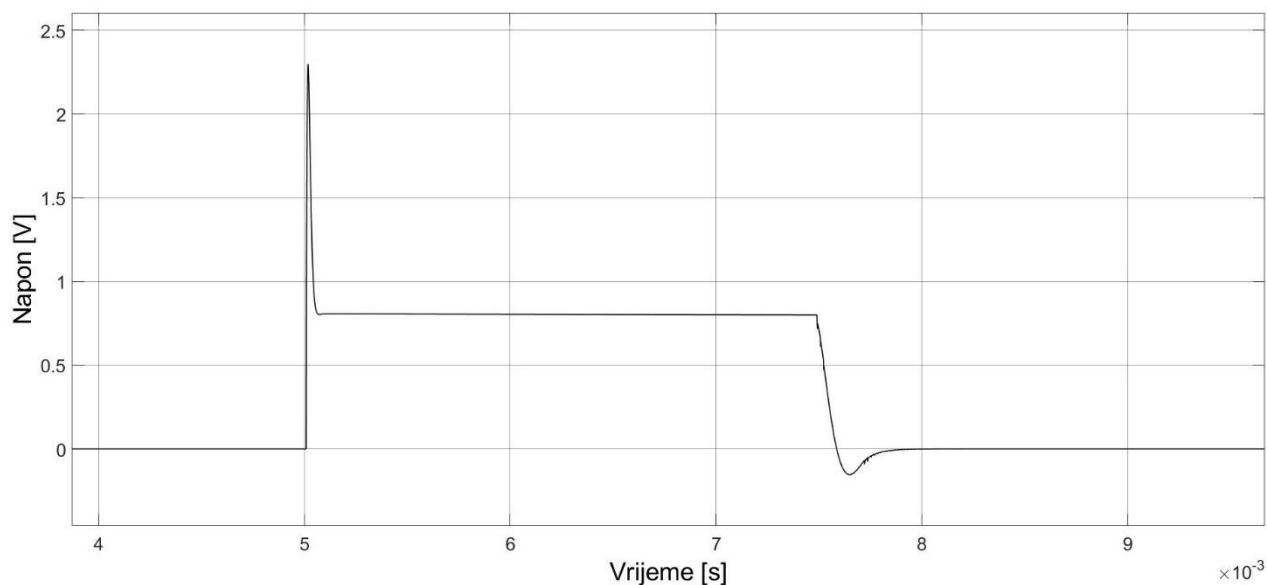
Slika 5.20 Blok parametri kontrolnog prekidača

U trenutku kada se desi proboj/preskok izolacije na diodama D2 i D3 dolazi do promjene napona na diodama diodnog mostnog ispravljača (slika 5.21).

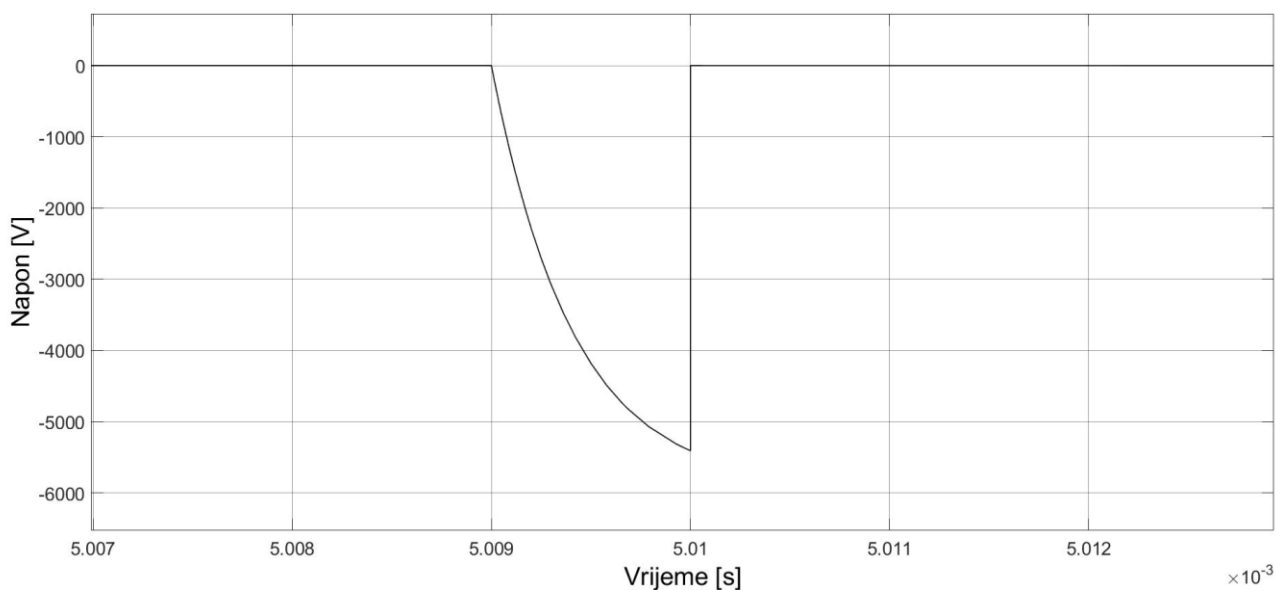


Slika 5.21 Talasni oblik napona na diodama diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača

Kao što se može vidjeti na slici 5.22 napon na diodama D1 i D4 je identičan, nema većih promjena intenziteta naponskog talasa jer je amplitudna vrijednost tog napona i prije simulacije proboja/preskoka izuzetno niska i iznosi 2.3V. Napon na diodama D2 i D3 je identičan (slika 5.23), gdje usljed simulacije proboja/preskoka u trenutku 5.01ms dolazi do rapidne promjene intenziteta naponskog talasa. Naime, napon sa prethodnih 5.750V pada na vrijednost blisku 0V.



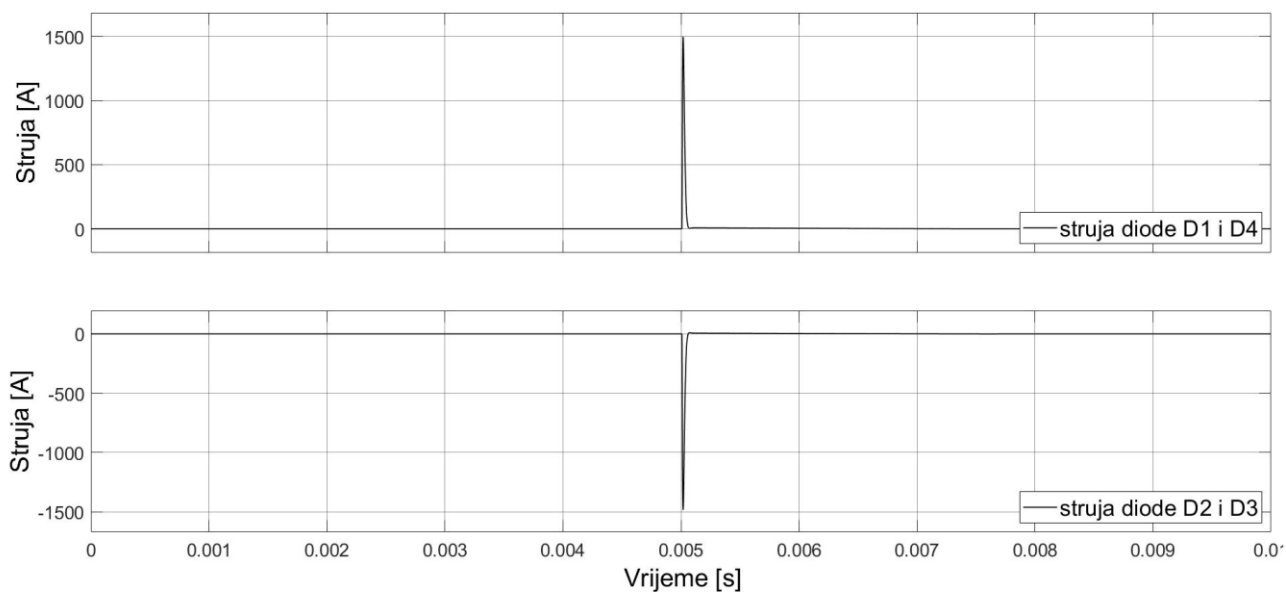
*Slika 5.22 Talasni oblik napona na diodama D 1 i D4 diodnog mostnog ispravljaja tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljaja*



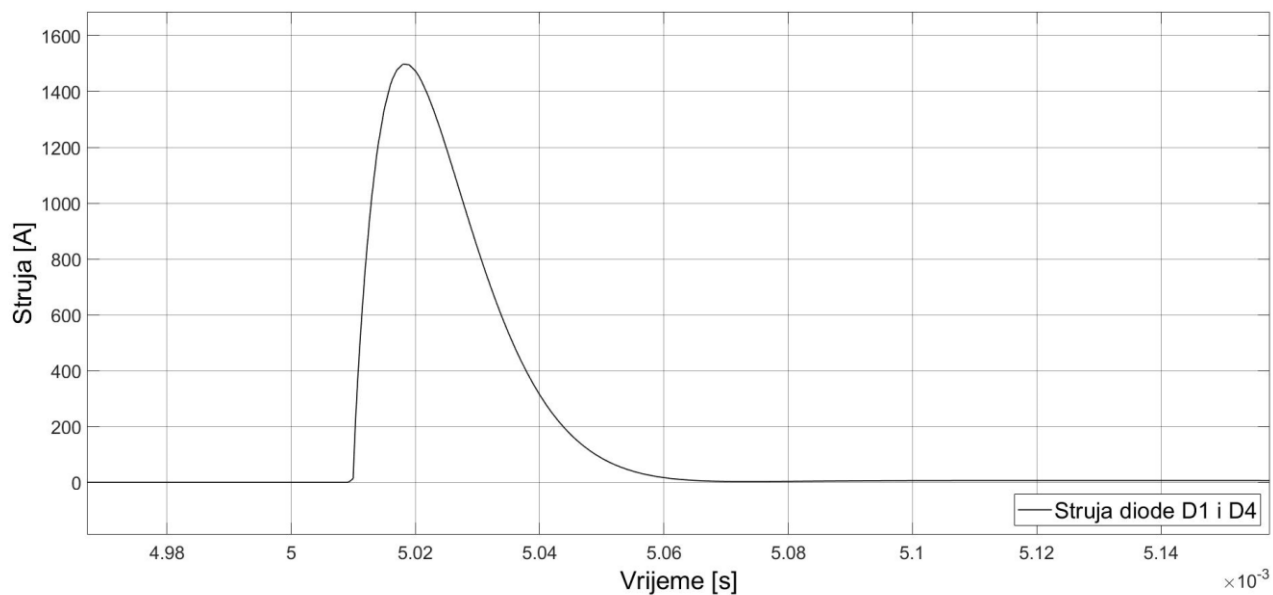
*Slika 5.23 Talasni oblik napona na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljaja tokom simulacije proboja/ preskoka izolacije na tim diodama*

Simulacija proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 pokazuje da je pojava struja unutar diodnog mostnog ispravljaja značajno izraženija pojava nego promjena napona na diodama diodnog mostnog ispravljaja (slika 5.24.) Struja kroz diode D1 i D4 ima isti talasni oblik (slika 5.25), dok struja kroz diodni par D2 i D3 ima identičan talasni oblik (slika 5.26). Lako se može primjetiti da u trenutku 5.01ms struja kroz sve četiri diode naglo počinje da raste, strmina uspona intenziteta struje se značajno mijenja, a to je uslovljeno spojem koji je nastao kao posledica

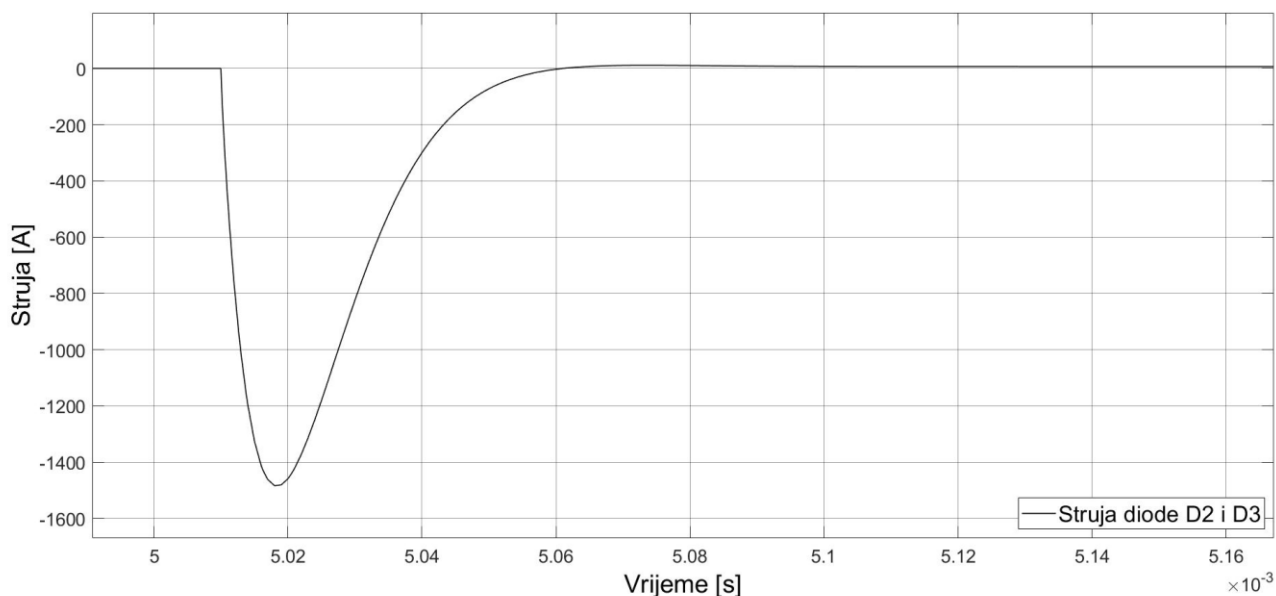
proboja/preskoka izolacije dioda D2 i D3. Struja kroz sve četiri diode dostiže amplitudnu vrijednost strujnog talasnog oblika blisku vrijednosti od 1500A.



*Slika 5.24 Talasni oblik struje kroz diode diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača*

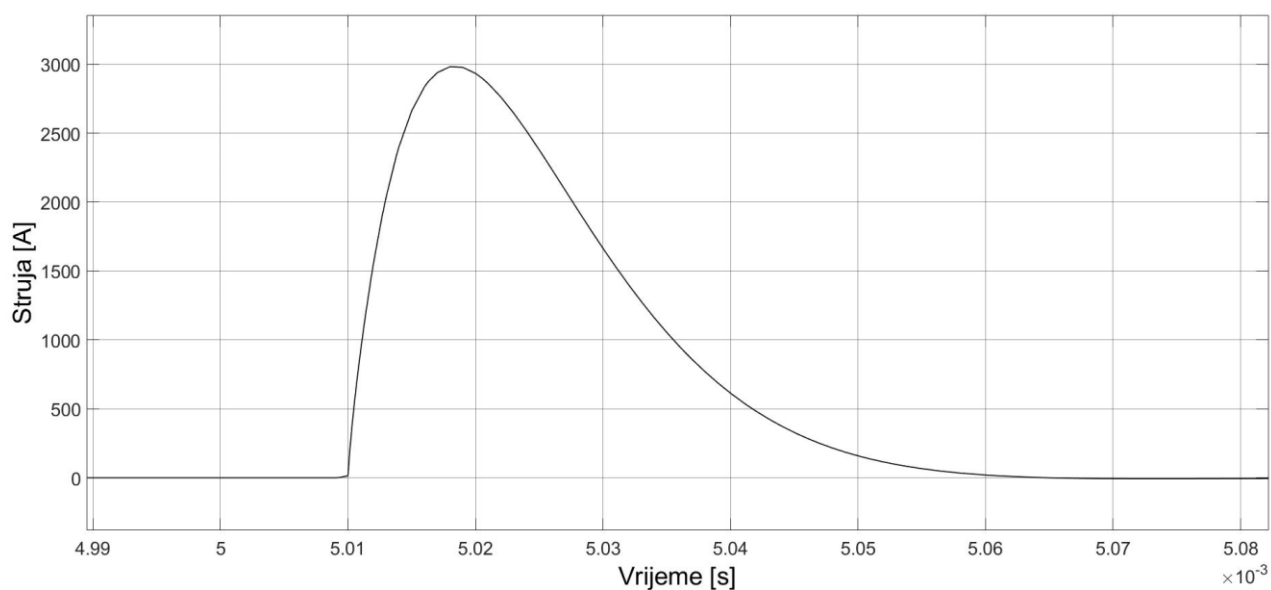


*Slika 5.25 Talasni oblik struje kroz diode D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača*



*Slika 5.26 Talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača*

Prikazani intenzitet struje je izuzetno zabrinjavajući i može da ugrozi ispravno funkcionisanje punionice za električne automobile. Šta više, ovakva vrijednost struje može da prouzrokuje i pregorijevanje odnosno kvar cijelog diodnog ispravljača [27], a potencijalno i ostalih elemenata punionice za električne automobile. Međutim, usljed pojave proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 dolazi do pojave kratkog spoja pa se ulazna struja razlaže na diode D1 i D4 pa je s tim ulazna struja u diodni mostni ispravljač mnogo većeg intenziteta od prethodno prikazanog intenziteta struje kroz pomenute diode (slika 5.27).



*Slika 5.28 Talasni oblik struje na ulazu diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača*

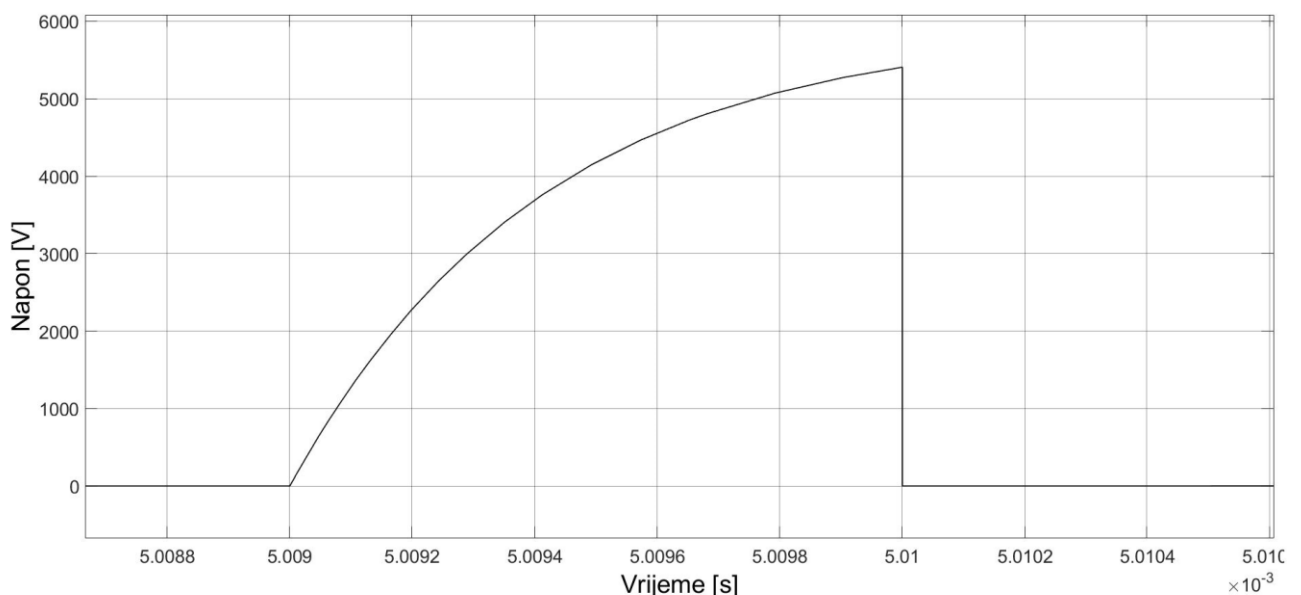


Struja na ulazu diodnog mostnog ispravljača dostiže vrijednost od gotovo 3000A, što dodatno povećava rizik od pregorijevanja i kvara pojedinih elemenata punionice za električne automobile.

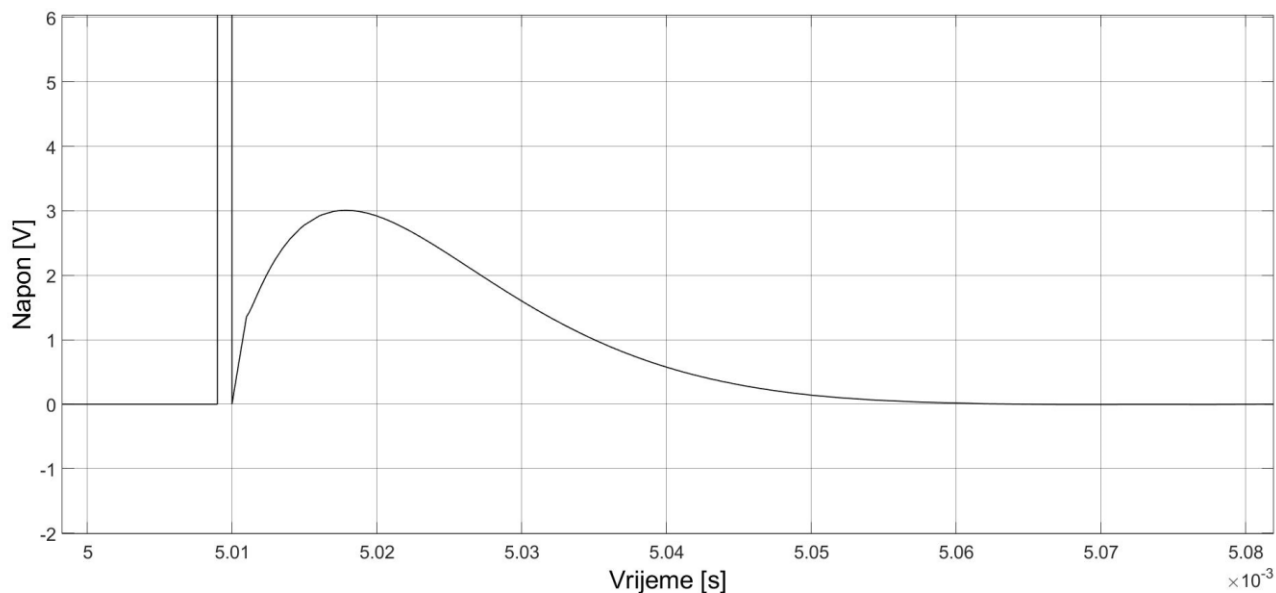
#### 5.1.3.2. Simulacija proboja/preskoka izolacije na kalemu APFC-a

Analizirajući različite potencijalno neželjene scenarije proboja/preskoka izolacije usljed izuzetno visoke amplitude udarnog naponskog talasa postoji potreba da se izvrši simulacija proboja/preskoka izolacije na induktivnom elementu (kalemu) na izlazu diodnog mostnog ispravljača. Naime, amplituda napona prilikom pojave prenaponskog talasa izazvanog atmosferskim pražnjenjem modelovanim kombinovanim naponskim talasom dostiže vrijednost od 5750V. Upravo kao što je ovaj napon predstavljao opasnost za izolaciju elemenata diodnog mostnog ispravljača, na sličan način može da izazove proboj/preskok izolacije induktivnog elementa [26].

Simulacija proboja/preskoka izolacije induktivnog elementa je modelovana na identičan način, uz pomoć idealnog prekidača, kao što je to izvršeno u slučaju proboja/preskoka izolacije diode diodnog mostnog ispravljača. Prekidač je podešen da u trenutku 5.01ms izvrši manipulaciju i izazove efekat proboja/preskoka izolacije, u tom trenutku napon na kalemu sa prvobitnih 5750V drastično pada na nultu vrijednost (slika 5.29), nakon čega dostiže vrijednost od 3V i polako smanjuje intenzitet sa slabljenjem uticaja atmosferskog pražnjenja (slika 5.30).



Slika 5.29 Talasni oblik napona na induktivnom elementu (kalemu) APFC-a u opsegu do 6000V tokom simulacije proboja/preskoka izolacije kalema APFC-a

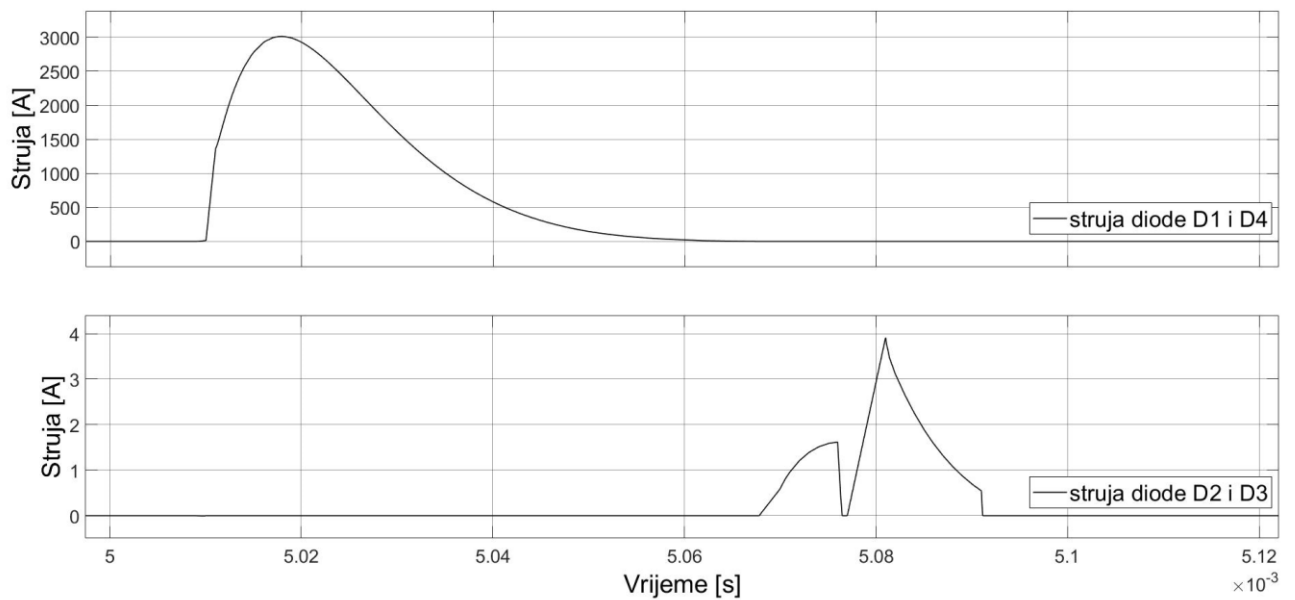


*Slika 5.30 Talasni oblik napona na induktivnom elementu (kalemu) APFC-a u opsegu do 6V tokom simulacije proboja/preskoka izolacije kalema APFC-a*

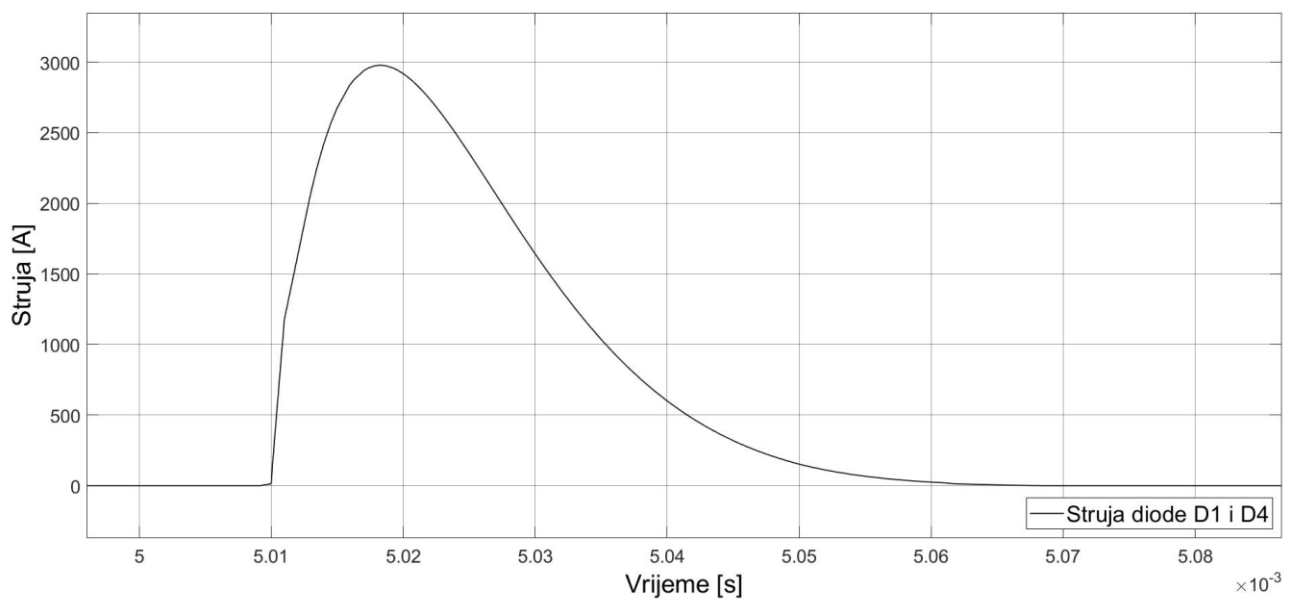
Kao posledica proboja/preskoka izolacije induktivnog elementa (kalema) javlja se niz negativnih pojava koje potencijalno mogu da prouzrokuju kaskadna oštećenja delova punionice za električne automobile.

Struja kroz diode diodnog mostnog ispravljača mijenjaju svoj talasni oblik ali i intenzitet (slika 5.31). Struja kroz diode D1 i D4 ima isti talasni oblik (slika 5.32), dok struja kroz diode D2 i D3 ima isti talasni oblik (slika 5.33). Naime, opasne vrijednosti struja se ispoljavaju kroz diode D1 i D4 gdje struja dostiže amplitudnu vrijednost od  $\sim 3000A$  što je izuzetno visoka vrijednost koja predstavlja visok rizik po elemente diodnog mostnog ispravljača [27]. Ista vrijednost amplitude talasnog oblika struje se pojavljuje i na samom ulazu u punionicu, što može izazvati dodatne neželjene posledice, oštećenja ili kvar same punionice.

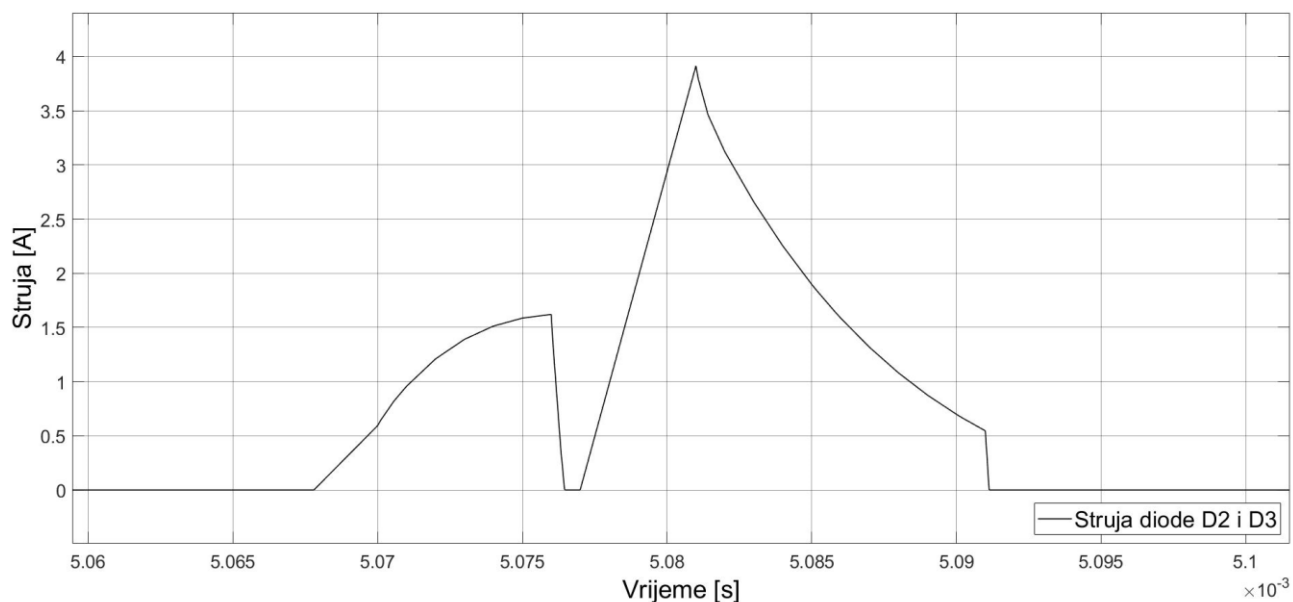
Struja kroz diode D2 i D3 ne protiče sve do trenutka 5.07ms, kada počinje da protiče struja izuzetno malog intenziteta do 2.7A. Talasni oblik i amplituda struje kroz ove diode ne upućuje na potencijalni problem ili oštećenje istih.



*Slika 5.31 Talasni oblik struja kroz diodni mostni ispravljač tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na kalemu APFC-a*

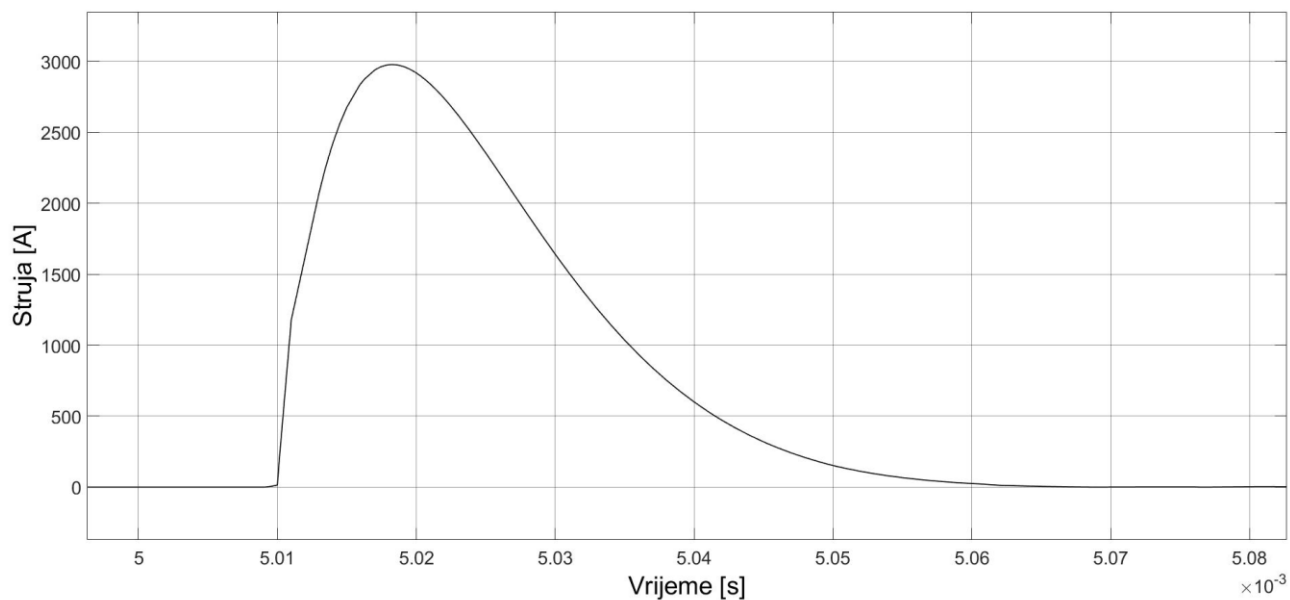


*Slika 5.32 Talasni oblik struje kroz diode D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na kalemu APFC-a*



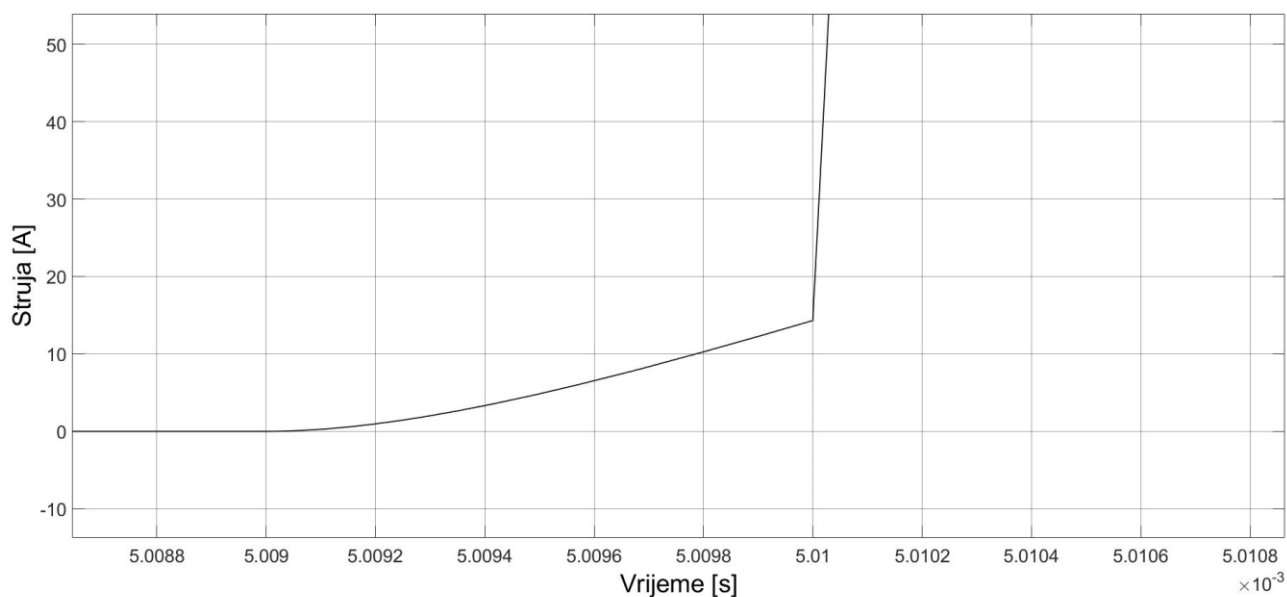
*Slika 5.33 Talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na kalemu APFC-a*

Analizirani proboj/preskok izolacije induktivnog elementa na izlazu diodnog mostnog ispravljača odnosno ulazu APFC-a jasno ukazuje na intenzivan porast amplitude struje kroz diodni mostni ispravljač koji se prenosi i kroz sami induktivni element (kalem) (slika 5.34), a kasnije i na ostale elemente APFC-a.



*Slika 5.34 Talasni oblik struje kroz induktivni element (kalem) APFC-a tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na tom elementu*

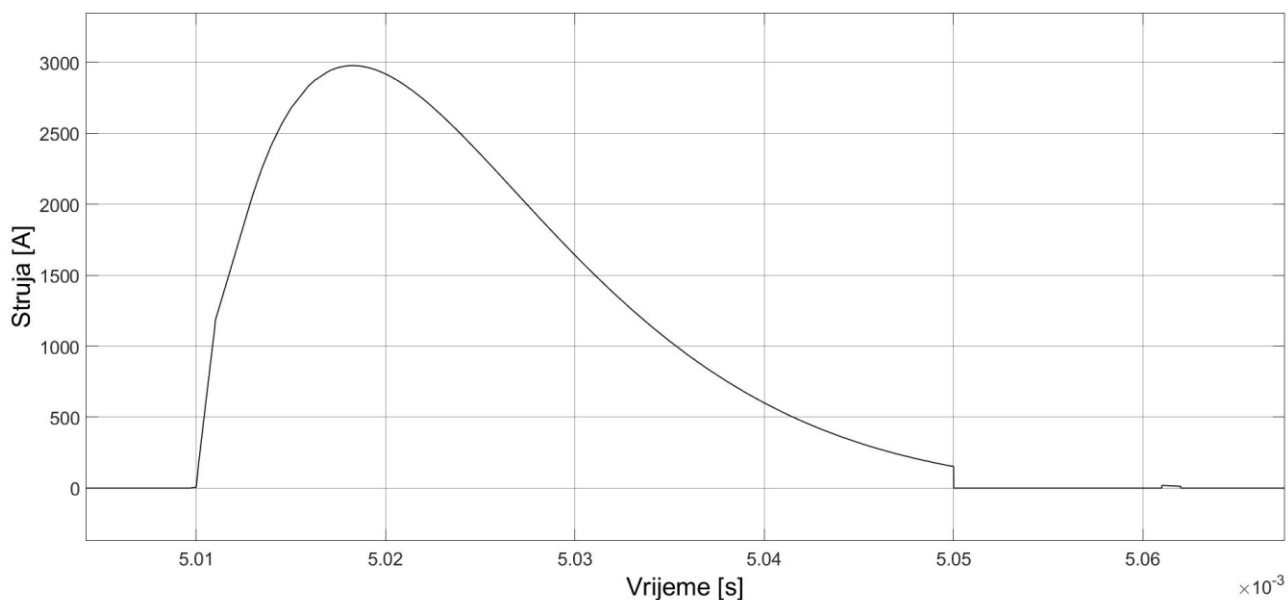
U trenutku 5.01ms kada se se simulira proboj/preskok izolacije dolazi do nagle promjene strmine porasta intenziteta struje (slika 5.35). Od tog trenutka intenzitet struje naglo raste, što se lako primjećuje analizirajući promjenu talasnog oblika struje kroz induktivni element (kalem).



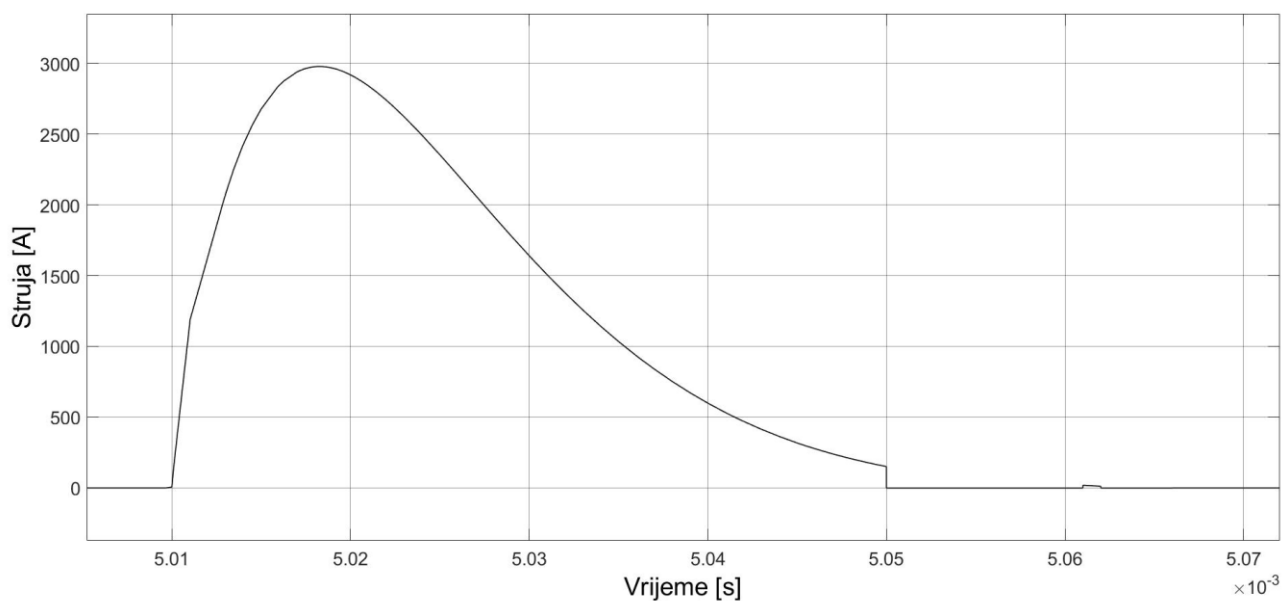
*Slika 5.35 Talasni oblik struje kroz kalem APFC-a u trenutku 5.01ms tokom simulacije proboja/preskoka izolacije na tom elementu*

APFC je modelovan tako da uz pomoć kontrolne petlje i referentnih vrijednosti teži da održi stabilan napon na izlazu iz APFC-a uz približno jedinični faktor snage. Stoga očekivano nastupa prekid protoka električne struje kroz MOSFET APFC-a, pa struja mijenja smjer i protiče kroz diodu koja je sastavni dio APFC-a gdje se zatvara kroz kapacitivni element (kondenzator) koji se nalazi na izlazu automatskog ispravljača faktora snage ka zemlji.

Talasni oblik i intenzitet struje koja protiče kroz diodu APFC-a je prikazan na slici 5.36. Amplituda talasnog oblika struje koja protiče kroz diodu iznosi 2800A što predstavlja opasnost od oštećenja diode ali i ostalih elemenata punionice za električne automobile. Izuzetno visoka vrijednost struje se dalje prenosi do ulaza u PSFB-a (fazno pomjerajući mostni konvertor) gdje kontrolisani MOSFET-ovi kontrolnom petljom reaguju i ograničavaju ovako visoke vrijednosti struje i uslovljavaju protok struje kroz kapacitivni element (kondenzator) ka zemlji (slika 5.37). Gotovo identičan talasni oblik struje koji protiče kroz diodu APFC-a može se primjetiti i kroz kapacitivni element. Naime struja dostiže vrijednost od 2800A što je izuzetno visoka vrijednost struje i potencijalno može prouzrokovati prekid odnosno oštećenje kapacitivnog elementa.



*Slika 5.36 Talasni oblik struje kroz diodu APFC-a tokom simulacije proboja/preskoka izolacije kalema APFC-a*



*Slika 5.37 Talasni oblik struje kroz kondenzator APFC-a tokom simulacije proboja/preskoka izolacije kalema APFC-a*

Sprovedena analiza rezultata upućuje da je potrebno izvršiti simulaciju prekida rada kapacitivnog elementa u nekom od trenutaka kada intenzitet struje dostigne izrazito visoku vrijednost. U tabeli 5.2 su prikazane vrijednosti struje kroz kapacitivne elemente u određenim vremenskim trenucima nakon simulacije proboja/preskoka izolacije induktivnog elementa (kalema) APFC-a.

Tabela 5.2 Intenzitet struje kroz kondenzator APFC-a u različitim vremenskim trenucima

Vremenski trenutak [ms]	Intenzitet struje [A]
<b>5.012</b>	1500
<b>5.014</b>	2300
<b>5.016</b>	2700

5.1.3.2.1. Prekid rada kapacitivnog elementa (kondenzatora)

Nakon detaljnih analiza koje su izvršene i simulacije proboja/preskoka izolacije induktivnog elementa (kalema) APFC-a u trenutku 5.01ms, uočava se izuzetno visok intenzitet struje kroz kapacitivni element (kondenzator) APFC. Dobijena vrijednost struje za svaki od odabranih vremenskih trenutaka (tabela 5.2) može potencijalno da prouzrokuje prekid (oštećenje) kapacitivnog elementa [30].

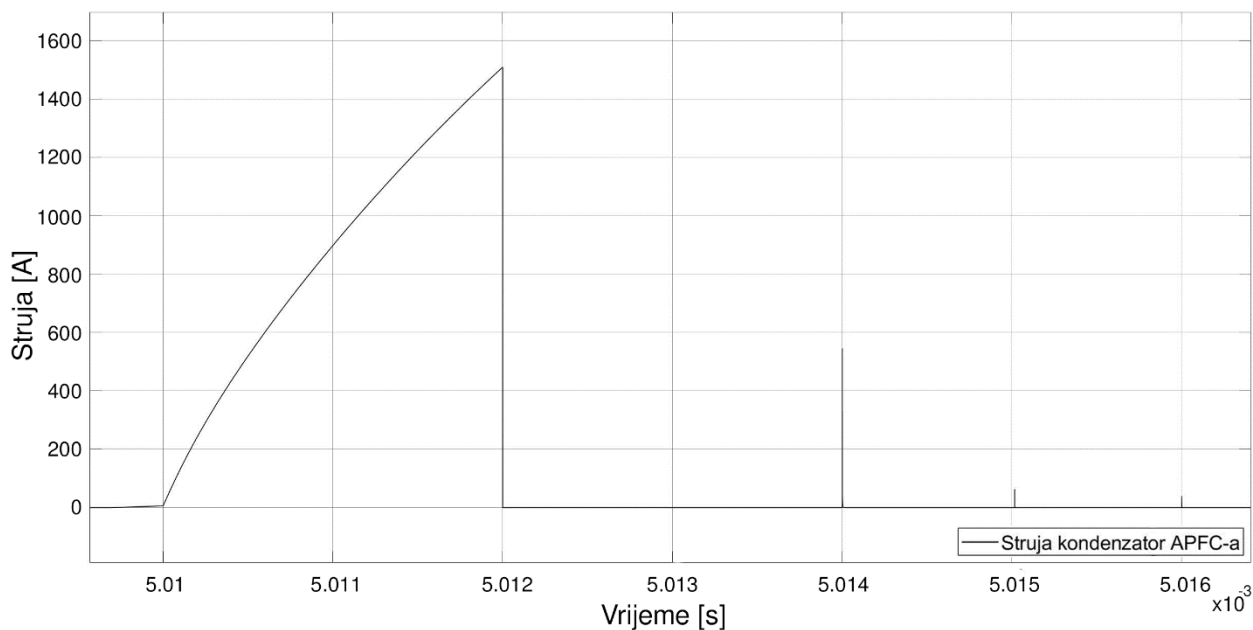
Kao logičan nastavak započete analize nameće se analiza prekida (oštećenja) kapacitivnog elementa APFC-a. Stoga se na već uspostavljenu simulaciju proboja/preskoka izolacije kalema APFC-a dodaje idealni prekidač ispred kapacitivnog elementa čiji je zadatak da isključi (odvoji) kapacitivni element od ostatka punionice za električne automobile i na taj način simulira oštećenje zadanog elementa.

U nastavku je data analiza naponskih i strujnih talasnih oblika unutar punionice za električne automobile u slučaju da dođe do ispada odnosno oštećenja kapacitivnog elementa APFC-a. Naponski i strujni talasni oblici pokazuju izuzetno visoke vrijednosti iznad graničnih (dozvoljenih) opsega. Prikaz rezultata izvršene analize je podjeljen u dvije cjeline:

- Strujni talasni oblici
- Naponski talasni oblici

5.1.3.2.1.1. *Strujni talasni oblici*

U trenutku 5.012ms startuje simulacija ispada (oštećenja) kapacitivnog elementa (kondenzatora) APFC. U tom trenutku struja koja protiče kroz taj element se prekida i naglo pada na nultu vrijednost (slika 5.38).

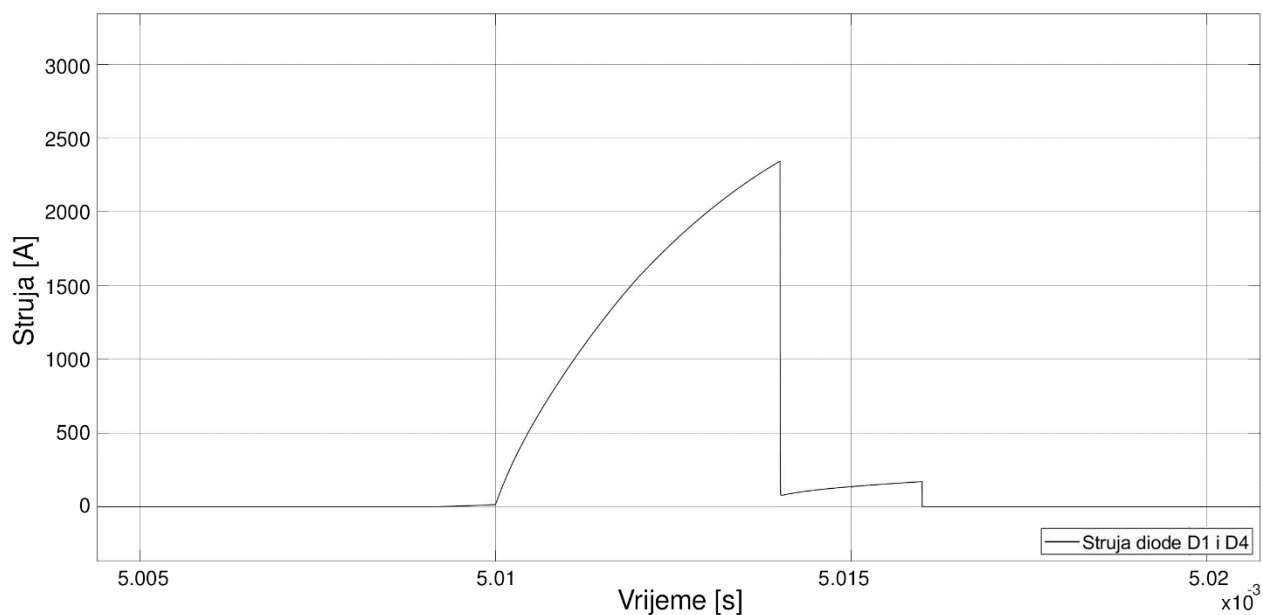


*Slika 5.38 Talasni oblik struje kroz kondenzator APFC-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

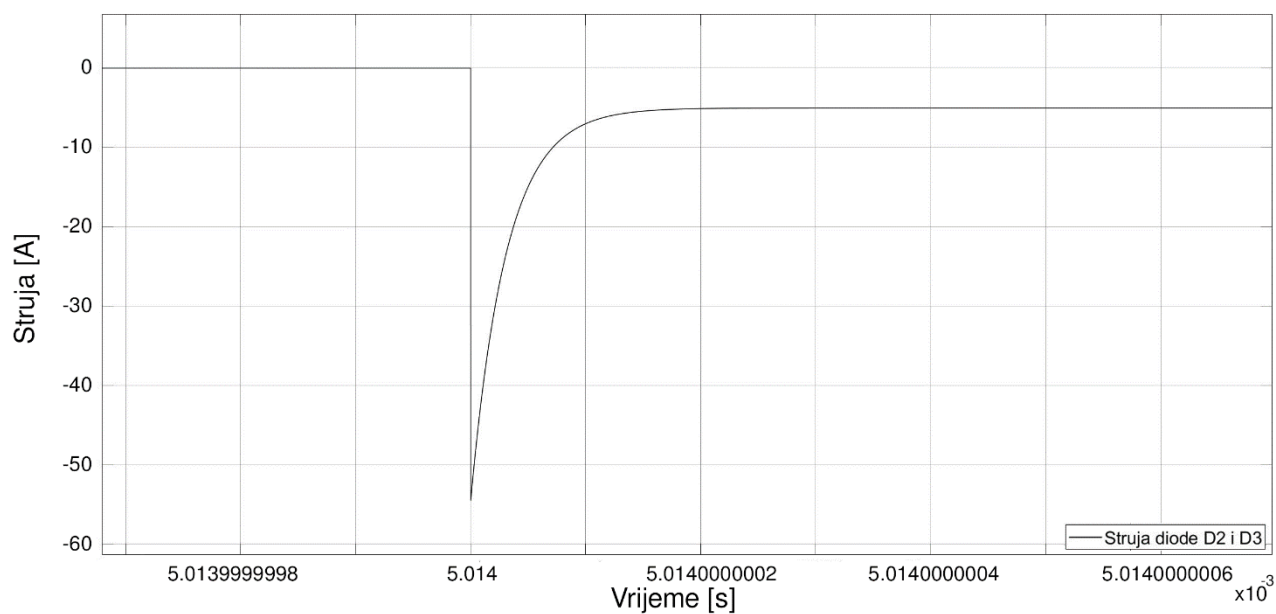
Simulacija se vrši u trenutku kada intenzitet struje dostigne vrijednost od 1500A. Međutim ovaj nagli i neočekivani prekid uzrokuje višestruke poremećaje kroz čitavu punionicu za električne automobile. Analizirani su elementi punionice počev od diodnog mostnog ispravljača pa preko APFC-a sve do PSFB-a i izlaza iz punionice za električne automobile.

Struja kroz diodni most poprima netipičan talasni oblik, struja kroz diode D1 i D4 (slika 5.39), dostiže vrijednost 2350A i protiče do trenutka 5.014ms. U tom trenutku intenzitet struje pada na vrijednost između 50-60A i počinju da provode diode D2 i D3 i to u suprotnom smjeru istim intenzitetom (slika 5.40). Ovo ukazuje na posledicu proboja i oštećenja dioda diodnog mostnog ispravljača i cirkulaciju struje unutar diodnog mosta.





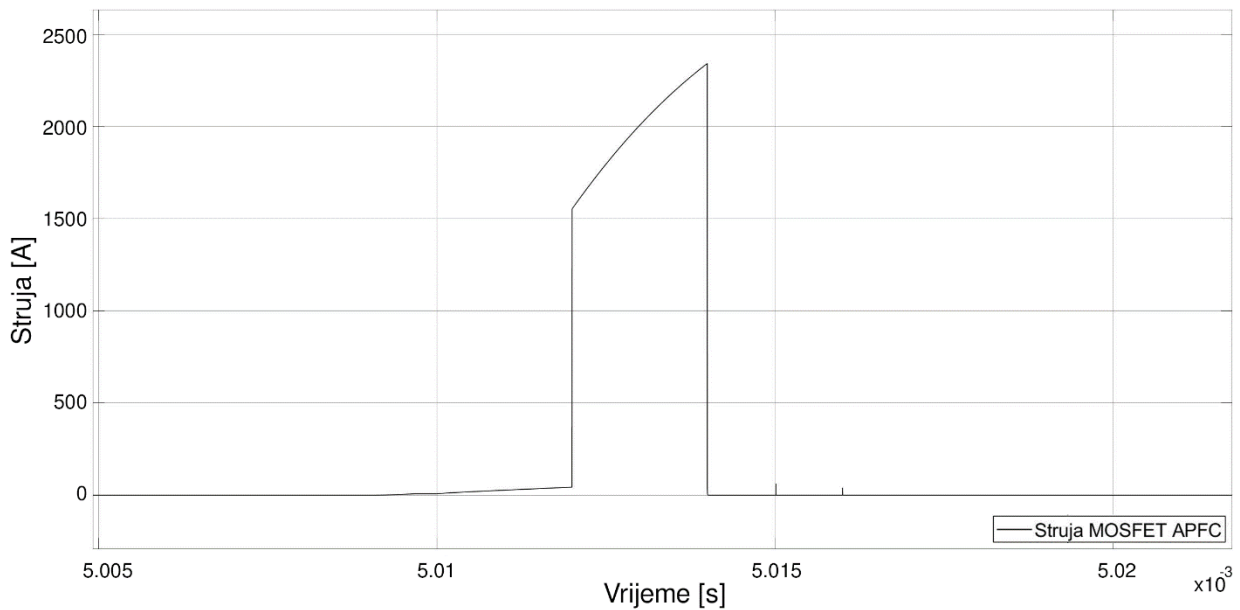
*Slika 5.39 Talasni oblik struje kroz diode D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*



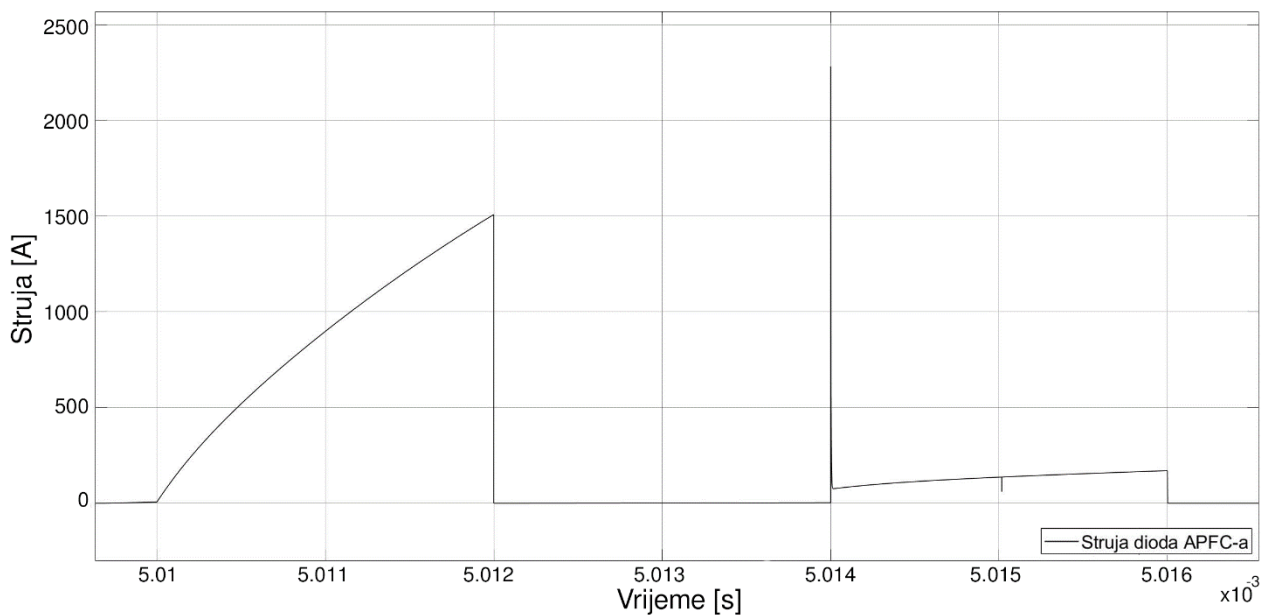
*Slika 5.40 Talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača u trenutku 5.014ms tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

Intenzitet struje kroz MOSFET koji čini dio APFC-a u trenutku 5.012ms počinje intenzivno da raste sve do vrijednosti 2350A, kada u trenutku 5.014ms naglo pada na nultu vrijednost (slika 5.41). U trenutku 5.014ms kontrolna petlja šalje naredbu ka MOSFET-u, pa struja počinje da protiče kroz diodu APFC-a (slika 5.42), sve do invertora PSFB-a. Dakle, struja prvobitno nakon prekida rada kondenzatora protiče kroz MOSFET da bi nakon dobijenog signala kontrolne petlje

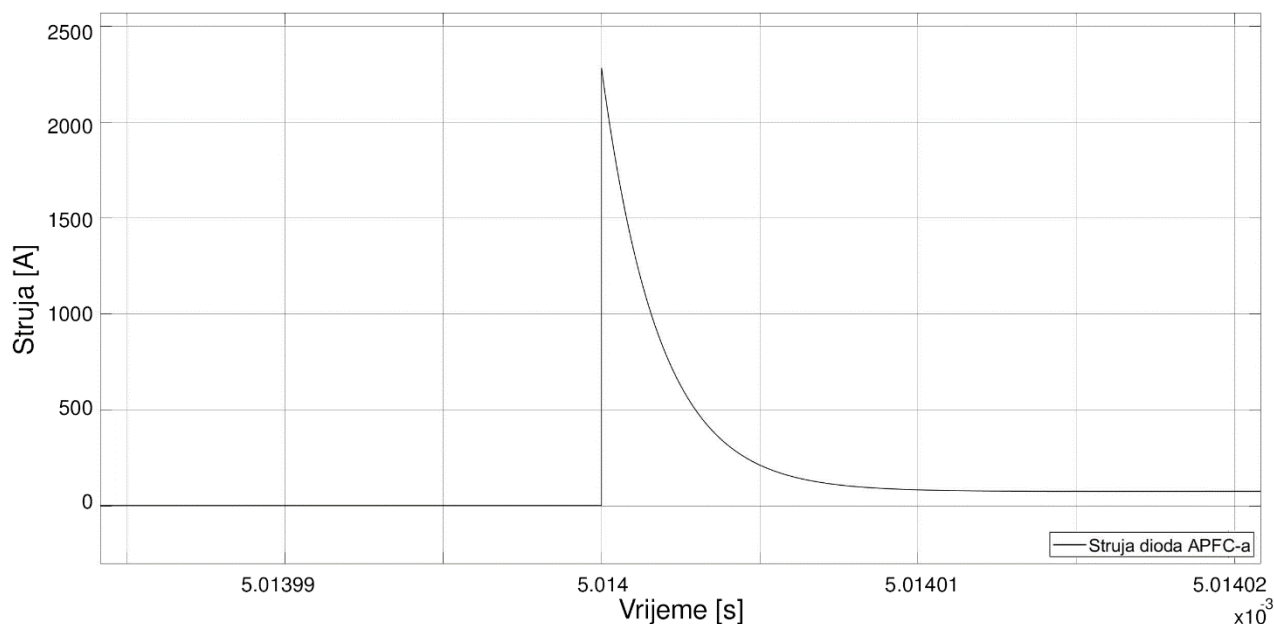
ponovo počela da protiče kroz diodu APFC-a i dalje ka PSFB-u. Međutim, trajanje struje kroz diodu, čiji intenzitet naglo poraste u trenutku 5.014ms, je svega nekoliko piko sekundi (slika 5.43).



*Slika 5.41 Talasni oblik struje kroz MOSFET APFC-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

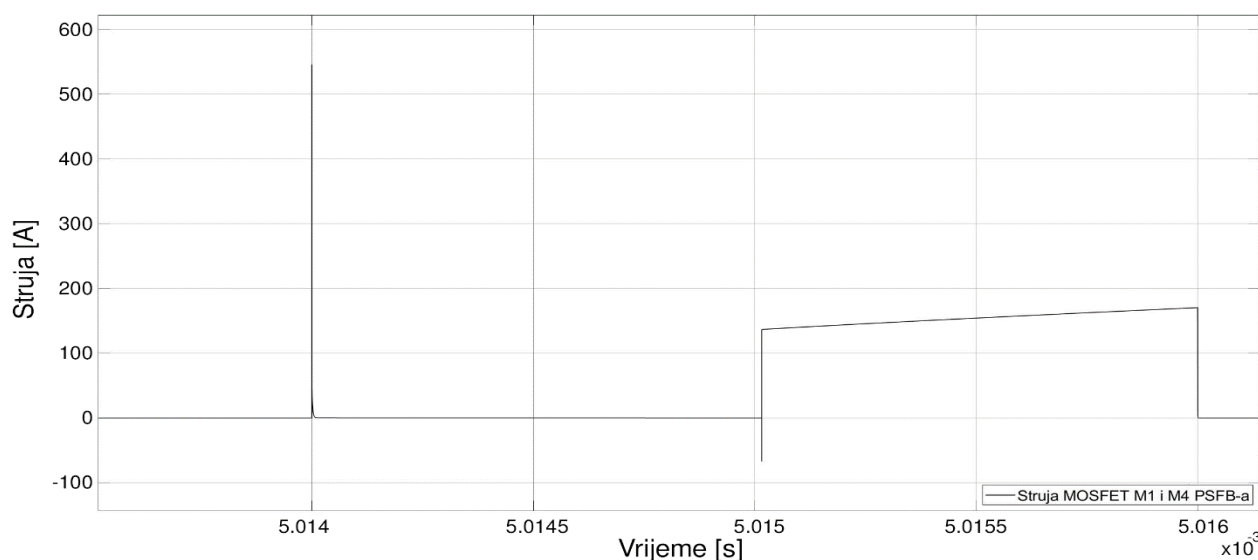


*Slika 5.42 Talasni oblik struje kroz diodu APFC-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

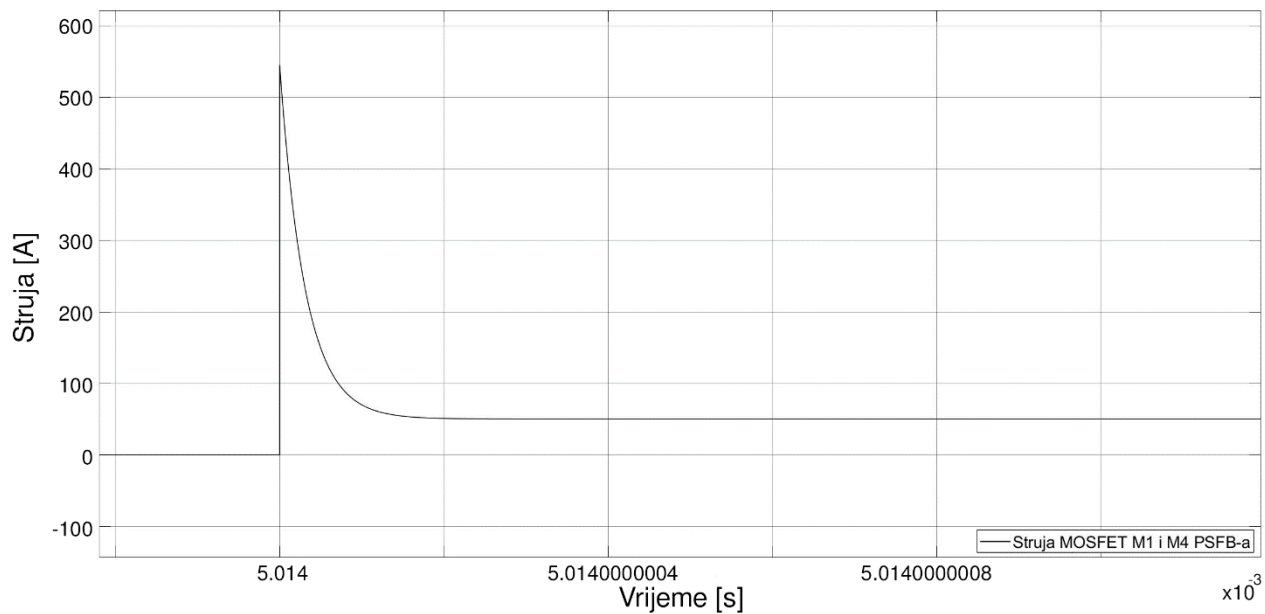


*Slika 5.43 Talasni oblik struje kroz diodu APFC-a u trenutku 5.014ms tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

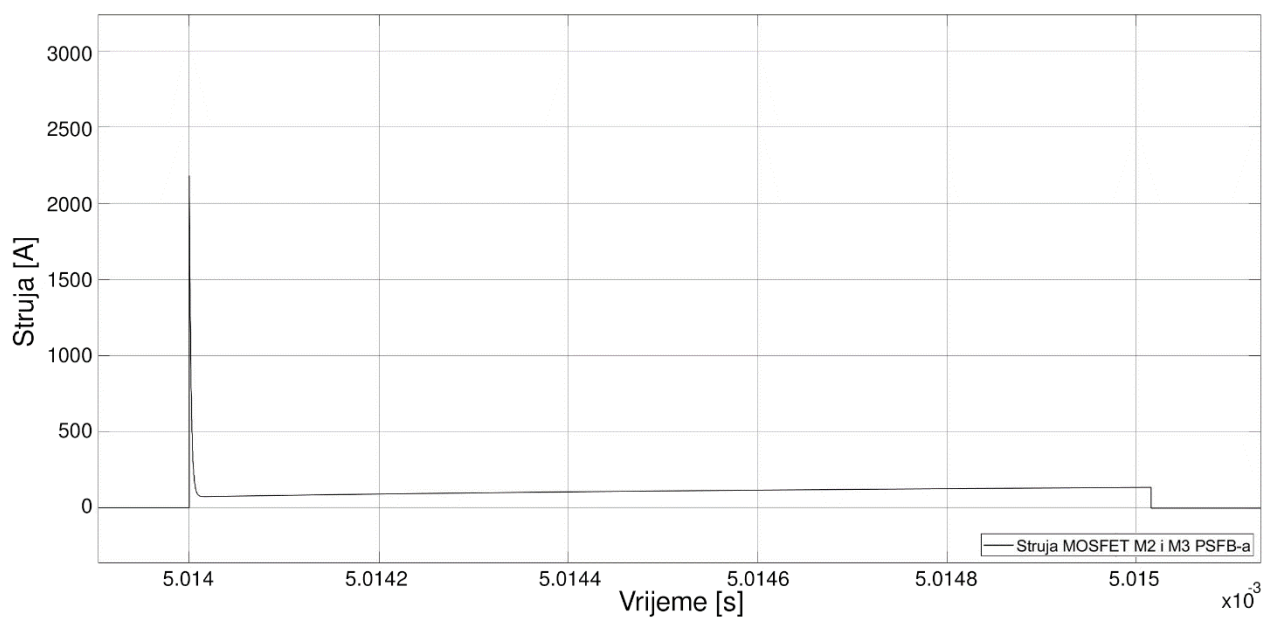
Usljed oštećenja kapacitivnog elementa (kondenzatora) struja visokog intenziteta se prenosi ka inventoru PSFB-a. Talasni oblik struje kroz MOSFET-ove M1 i M4 je prikazana na slici 5.44, dok je na slici 5.45 prikazan talasni oblik struje u trenutku 5.014ms kada dostiže i svoju maksimalnu vrijednost. Amplituda struje kroz navedeni par MOSFET-ova dostiže vrijednost od 540A. Dok struja kroz MOSFET-ove M2 i M3 (slika 5.46) dostiže značajno veću vrijednost 2200A. Na slici 5.47 je prikazan talasni oblik struje kroz MOSFET-ove M2 i M3 u trenutku 5.014ms. Očigledno je da svi MOSFET-ovi invertorskog mosta počinju da provode istovremeno, dok struja kroz MOSFET-ove M2 i M3 dostiže znatno veću amplitudu.



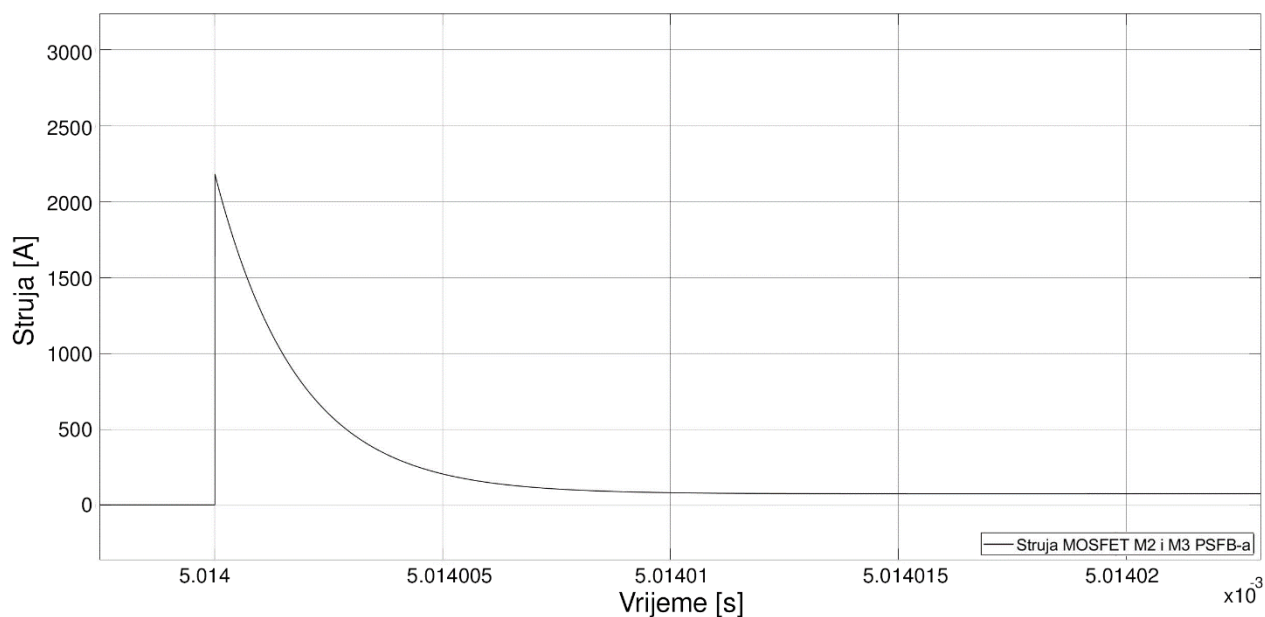
*Slika 5.44 Talasni oblik struje kroz MOSFET-ove M1 i M4 u toku simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*



*Slika 5.45 Talasni oblik struje kroz MOSFET-ove M1 i M4 u trenutku 5.014ms tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

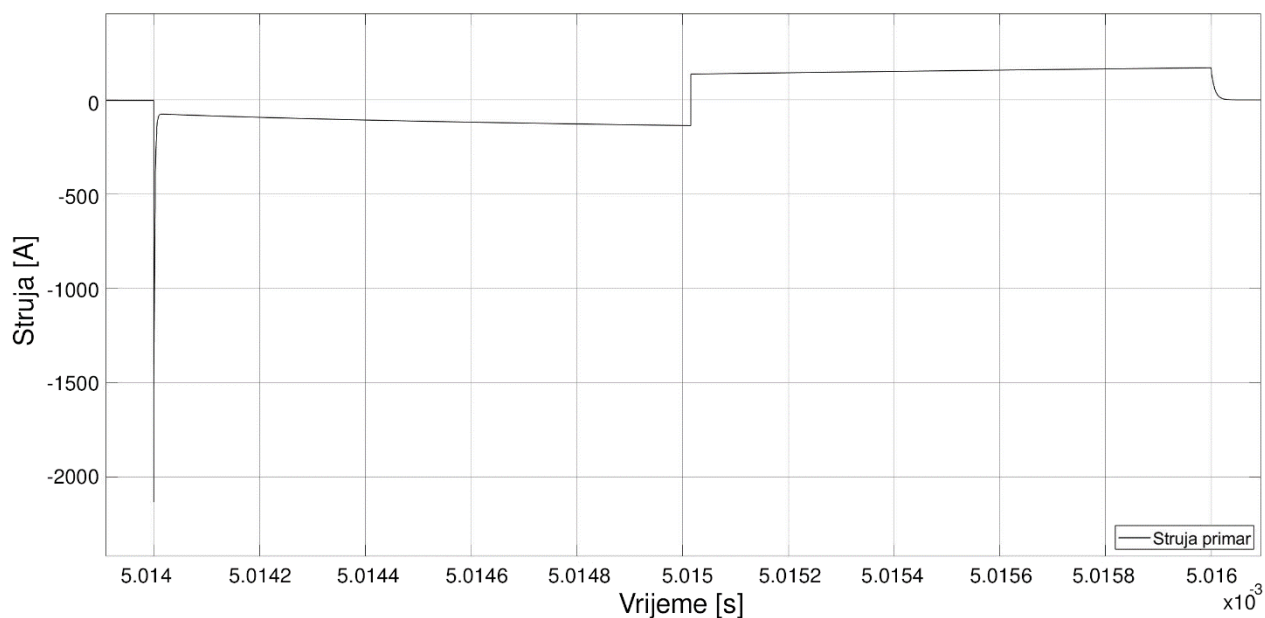


*Slika 5.46 Talasni oblik struje kroz MOSFET-ove M2 i M3 tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

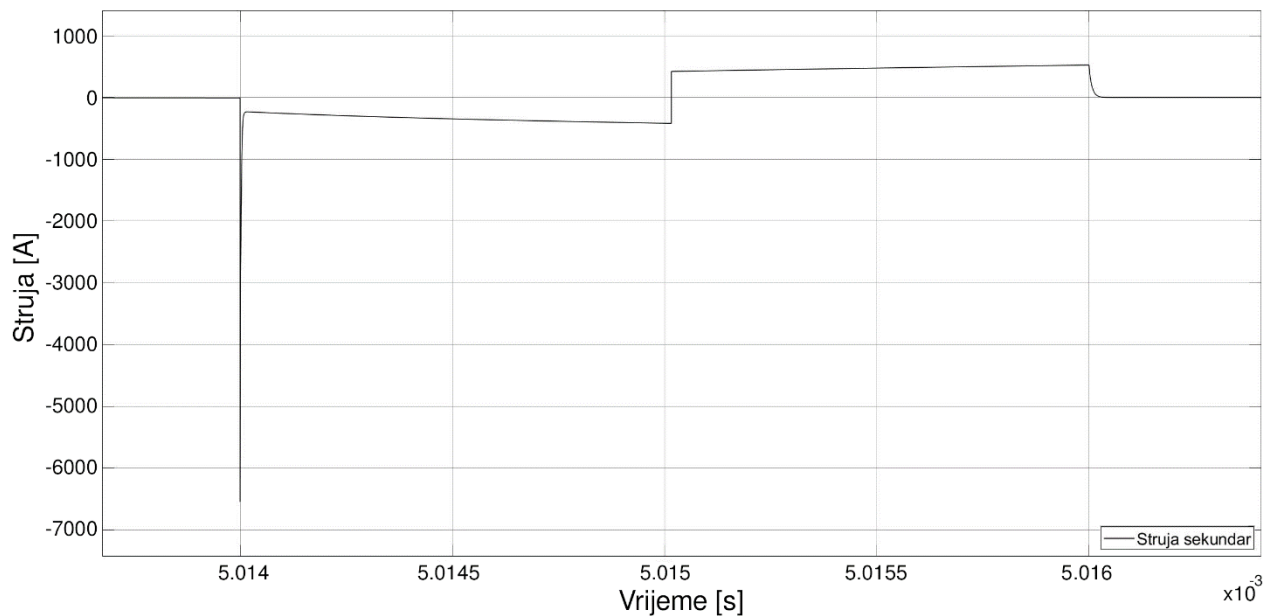


*Slika 5.47 Talasni oblik struje kroz MOSFET-ove M2 i M3 u trenutku 5.014ms tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

Talasni oblik struje koji se pojavljuje u trenutku 5.014ms na MOSFET-ovima invertorskog mosta PSFB-a prenosi se do linearnog transformatora PSFB-a gdje se intenzitet struje sa primara (slika 5.48), zbog prenosnog odnosa značajno povećava i dostiže maksimalnu vrijednost od 6600A (slika 5.49).

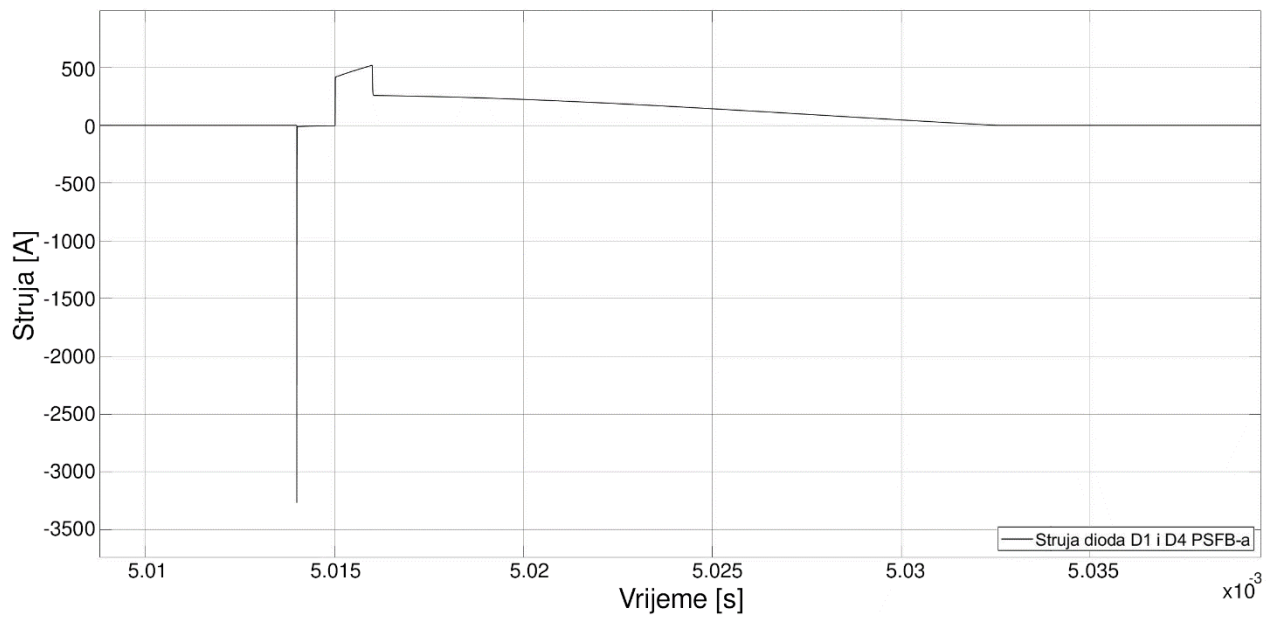


*Slika 5.48 Talasni oblik struje primara linearnog transformatora PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

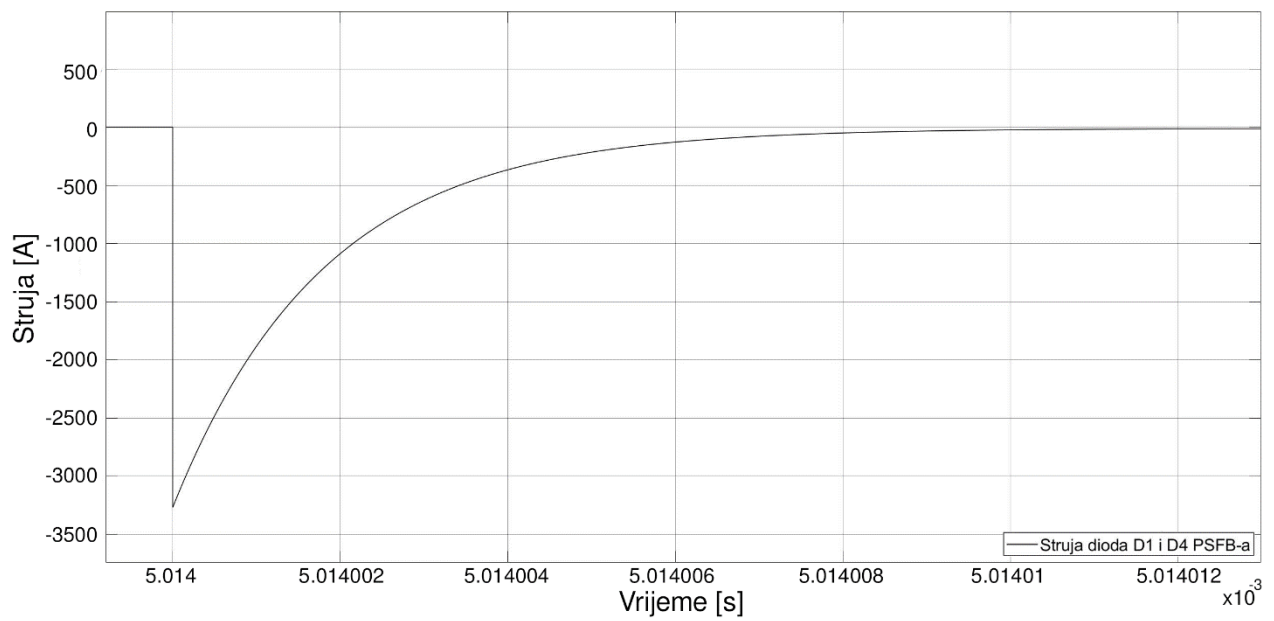


*Slika 5.49 Talasni oblik struje sekundara linearnog transformatora PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

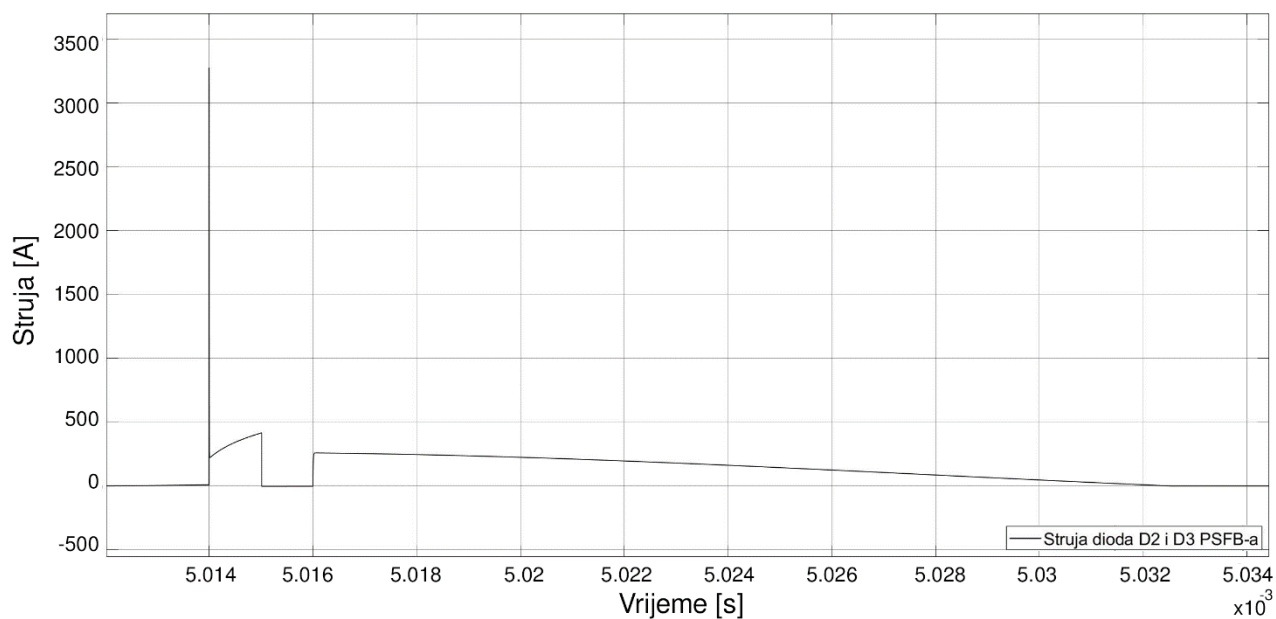
Problem izuzetno visoke vrijednosti amplitude struje sa primarne strane transformatora PSFB koja prevazilazi 2000A, potencijalno može uzrokovati oštećenje kako invertorskog mosta tako i elemenata punionice na koje nailazi prije nego dođe do invertorskog mosta. Pored tog izuzetno opasnog problema po elemente punionice za električne automobile javlja se još mnogo veća opasnost transformacijom i dostizanjem maksimalne vrijednosti struje na sekundarnoj strani transformatora PSFB-a od 6600A. Diode diodnog mostnog ispravljača PSFB-a su izložene izuzetno visokim vrijednostima struja. Destruktivno dejstvo atmosferskog pražnjenja kome je izložena punionica za električne automobile, a samim tim i diodni mostni ispravljač PSFB uslovljava pojavu nepravilnog funkcionisanja punionice za električne automobile. Struja kroz diodni most počinje da protiče kroz sve četiri diode i dostiže maksimalnu vrijednost od 3300A. Talasni oblik struja kroz diode D1 i D4 PSFB-a je identičan (slika 5.50), dok je talasni oblik struje u trenutku 5.014ms kada dostiže maksimalnu vrijednost prikazan na slici 5.51. Talasni oblik struje kroz diodni par D2 i D3 ima sličan oblik kao i diodni par D1 i D4 suprotnog znaka (slika 5.52), dok je talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 u trenutku 5.014ms prikazan na slici 5.53. Jasno je da se najveći procenat vrijednosti intenziteta struje zatvara upravo unutar diodnog mostnog ispravljača PSFB-a što je nepravilan način funkcionisanja punionice za električne automobile, dok intenzitet struje nagovještava potencijalno oštećenje elemenata diodnog mostnog ispravljača PSFB.



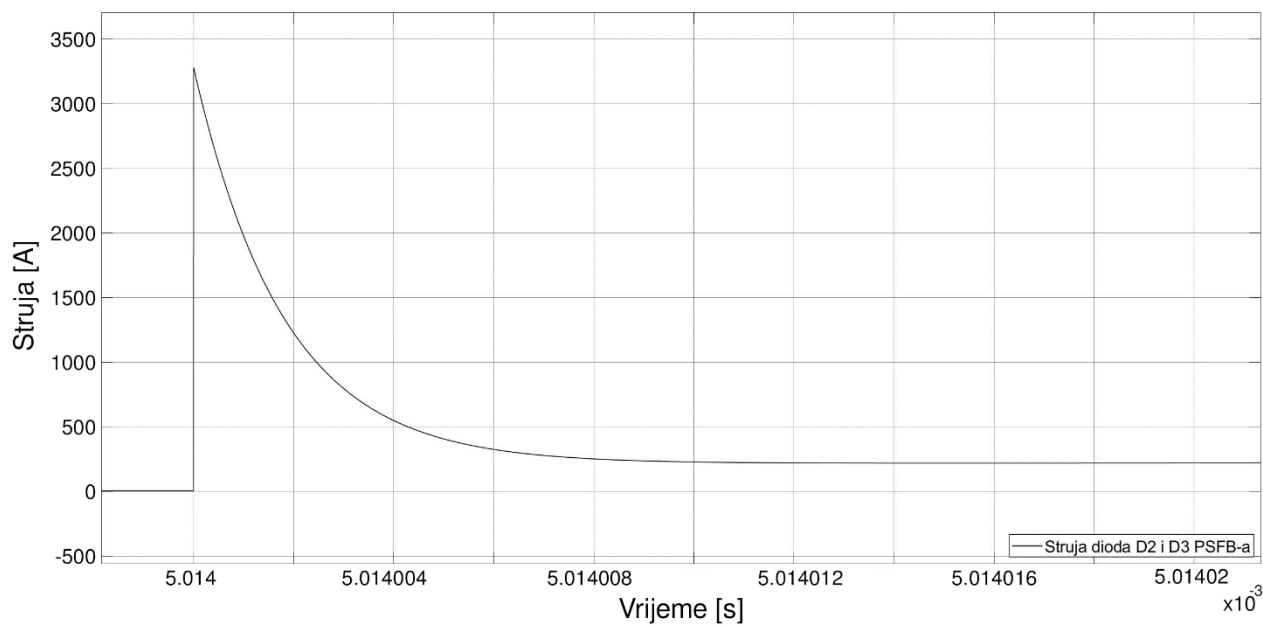
*Slika 5.50 Talasni oblik struje kroz diode D1 i D4 PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*



*Slika 5.51 Talasni oblik struje kroz diode D1 i D4 PSFB-a u trenutku 5.014ms tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*



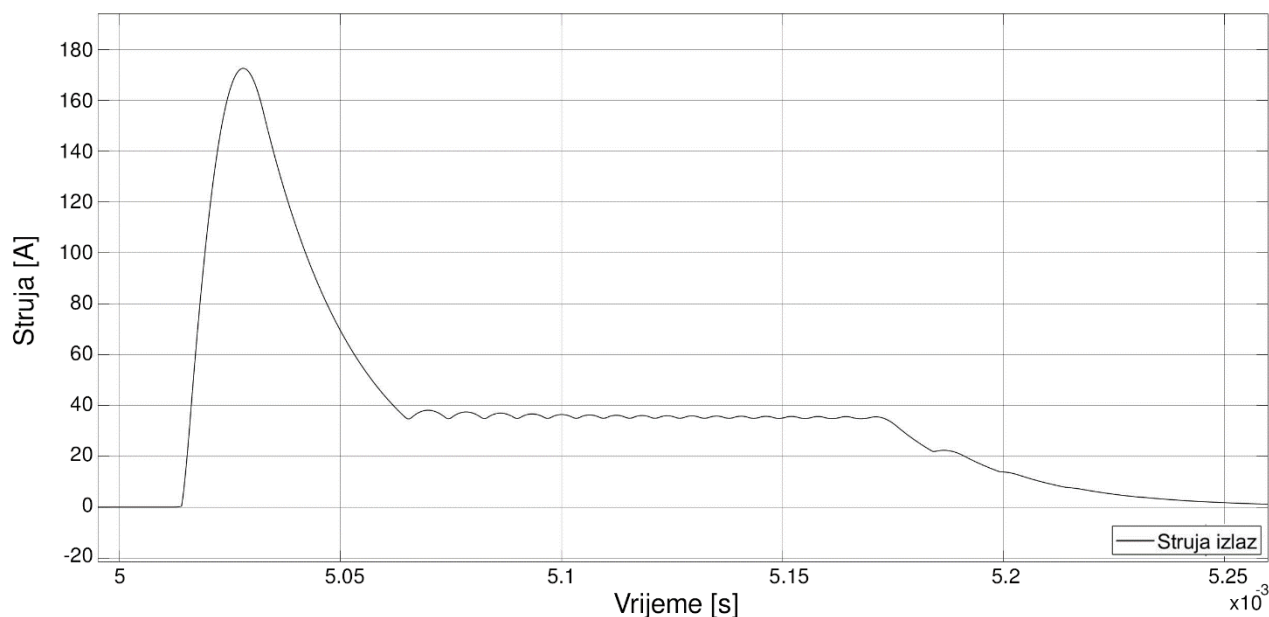
Slika 5.52 Talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a



Slika 5.53 Talasni oblik struje kroz diode D2 i D3 PSFB-a u trenutku 5.014ms tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a

Međutim, iako se u trenutku 5.014ms najveći dio intenziteta struje zatvara upravo unutar diodnog mostnog ispravljača PSFB-a, dolazi do pojave visokih intenziteta struje i unutar izlaznog filtra PSFB-a što se negativno odražava i na struju na samom izlazu punionice za električne automobile (slika 5.54).





*Slika 5.54 Talasni oblik struje na izlazu punionice za električne automobile tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

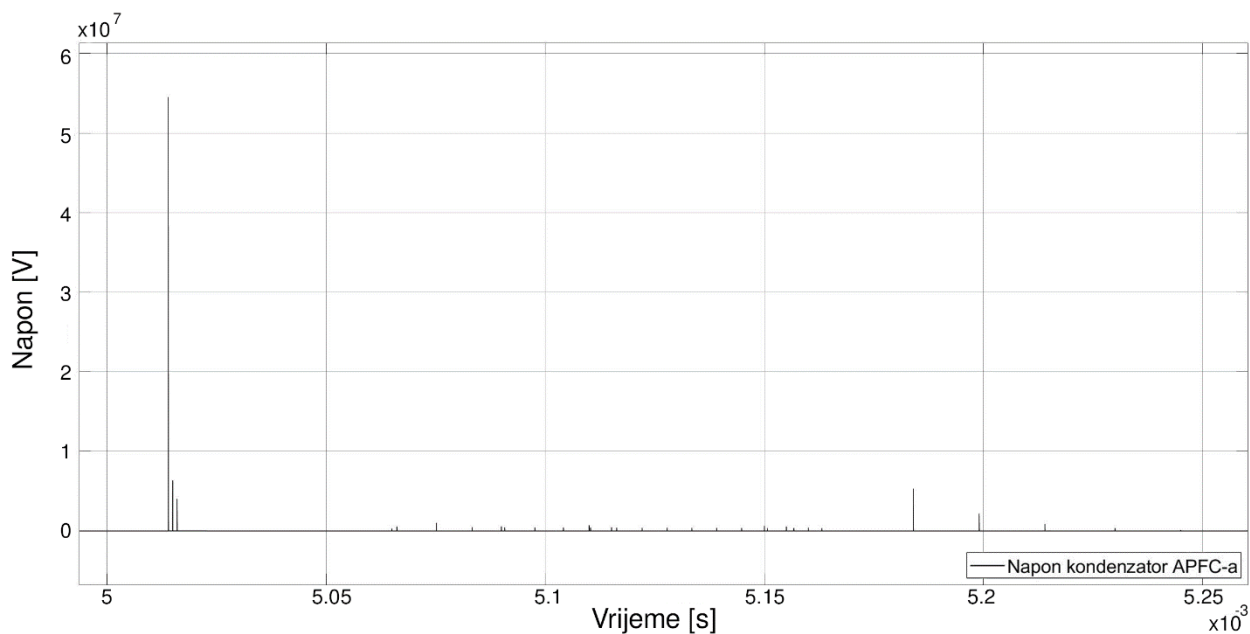
Struja kroz induktivni element filtra PSFB-a dostiže vrijednost od 500A od čega se značajan dio struje zatvara kroz kapacitivni element filtra dok maksimalna vrijednost talasnog oblika struje na izlazu punionice iznosi 170A. Nominalna vrijednost izlazne struje iznosi 16A, a dobijena vrijednost na izlazu ima više od deset puta veći intenzitet amplitude od nominalne vrijednosti, pa je lako doći do zaključka da postoji visok rizik od oštećenja kontrolnog mehanizma punjenja električnog automobila ili čak do oštećenja baterijskog sistema električnog automobila.

Na osnovu dobijenih rezultata, može se zaključiti da je veoma izvjesno kaskadno oštećenje izolacije ili samih komponenti punionice za električne automobile. Amplitude talasnih oblika struje kroz veći broj elemenata punionice za električne automobile su u izrazitom prekoračenju maksimalnih dozvoljenih vrijednosti. Međutim, rizik od oštećenja ne ostaje u domenu punionice za električne automobile već u slučaju kada je automobil priključen na punionicu za električne automobile može se desiti da se negativan efekat prenese na elemente električnog automobila, prioritetno baterijski sistem i sistem za kontrolu napajanja baterijskog sistema.

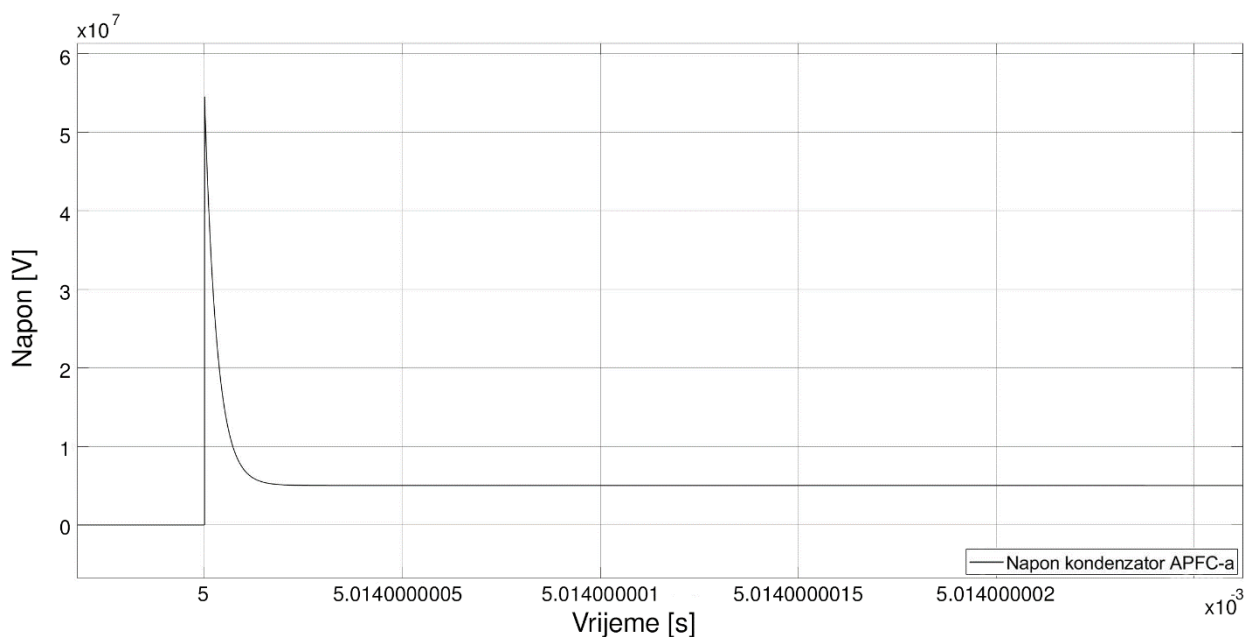
#### 5.1.3.2.1.2. Naponski talasni oblik

Prekidom (oštećenjem) kapacitivnog elementa (kondenzatora) APFC-a iniciraju se izuzetno visoke vrijednosti amplitude talasnog oblika napona. Tokom simulacije prekida rada kondenzatora u trenutku 5.012ms dolazi do sekvencijalnih prenaponskih udara amplitude vrijednosti reda veličine desetine MV (slika 5.55). Ovako visoke vrijednosti intenziteta naponskog

talasa prouzrokuju niz problema unutar punionice za električne automobile, dok je trajanje prenaponskih udara maksimalno 0.3 piko sekunde (slika 5.56).



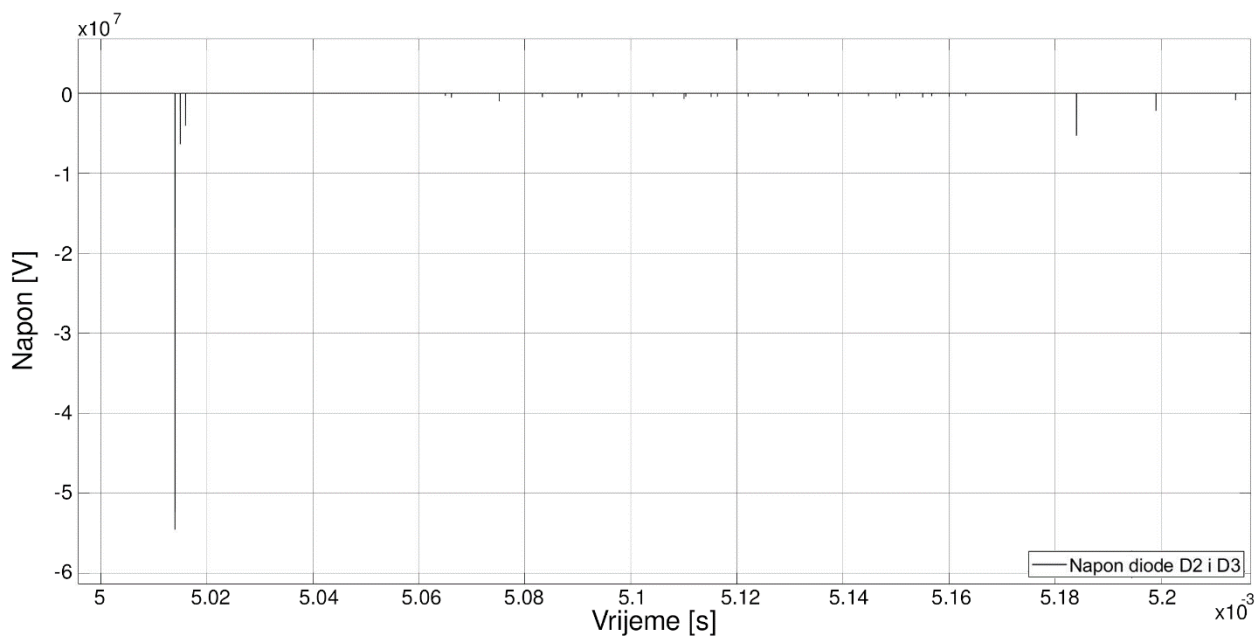
*Slika 5.55 Talasni oblik napona na kondenzatoru APFC-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*



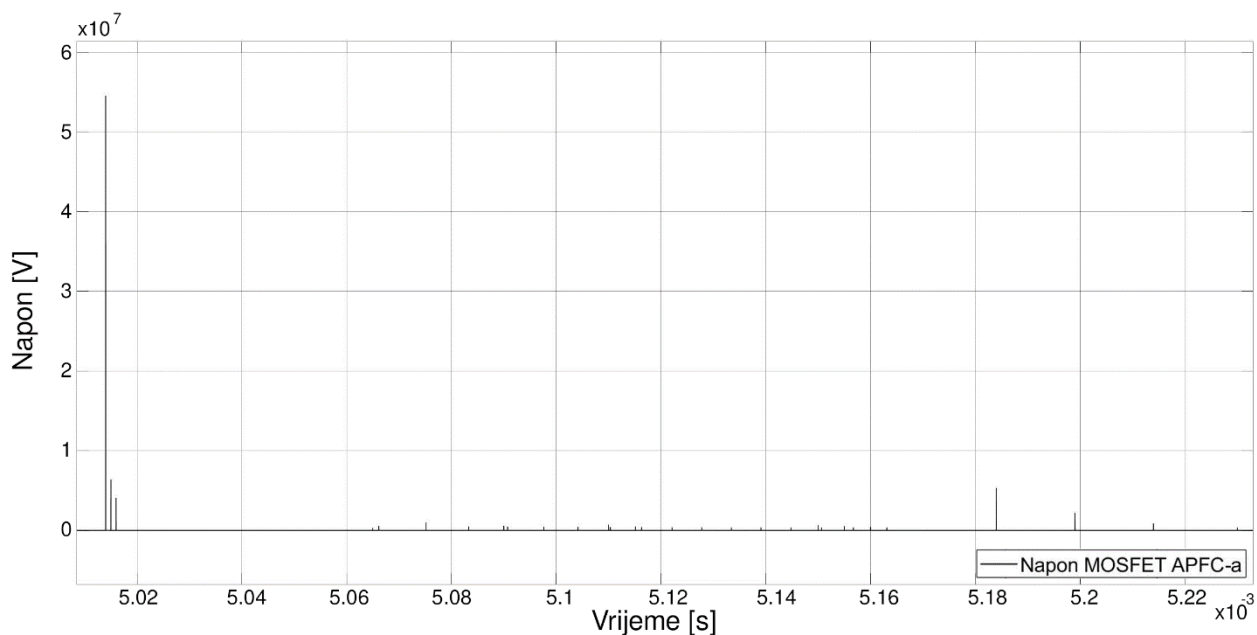
*Slika 5.56 Talasni oblik napona na kondenzatoru APFC-a u trenutku 5.014ms tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

Simulacijom prekida rada kondenzatora i pojavom sekvencijalnih prenaponskih udarnih talasa iniciraju se prenaponski udari na drugim elementima punionice za električne automobile. Naponski talasni oblici visokog rizika su očitani na ulazu punionice, odnosno na diodama D2 i D3

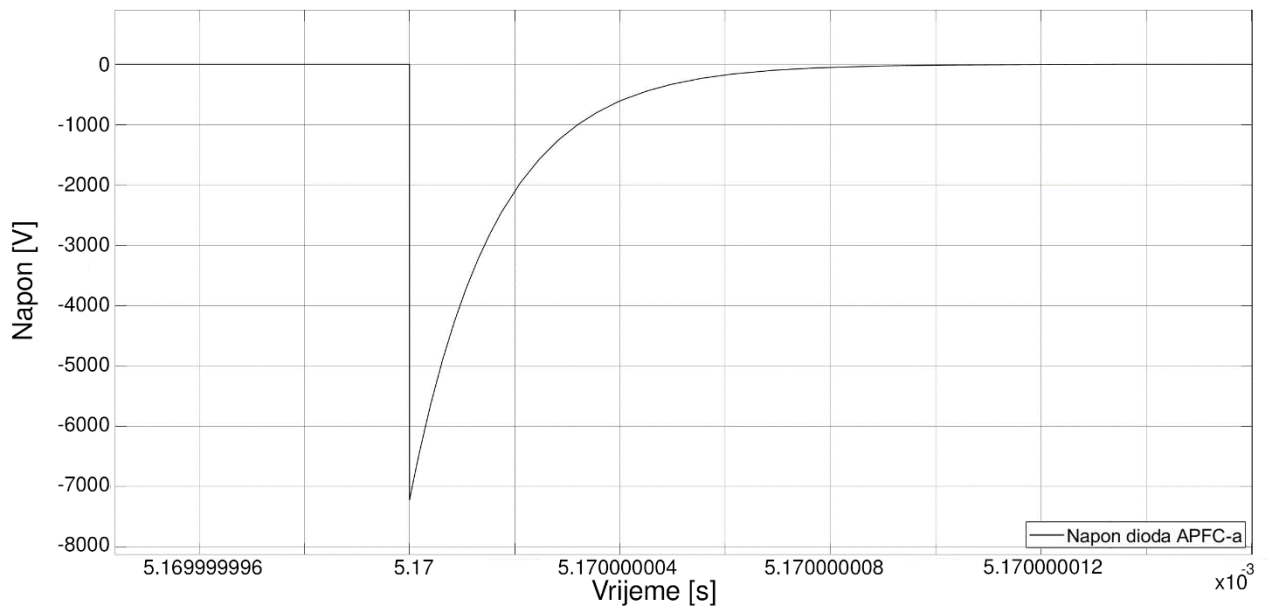
diodnog mostnog ispravljača (slika 5.57). Sekvencijalni naponski udari se očitavaju na MOSFET-u APFC-a (slika 5.58), dok se blago povećanje vrijednosti amplitude naponskog udara očitava na diodi APFC-a (slika 5.59).



*Slika 5.57 Talasni oblik napona na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

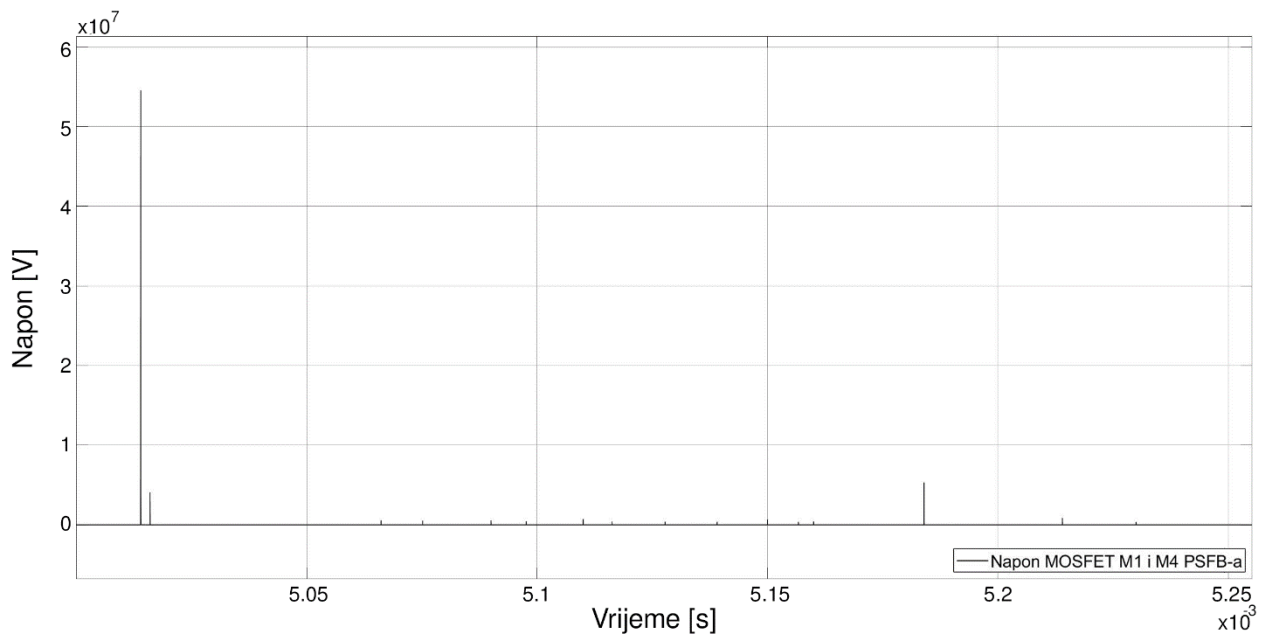


*Slika 5.58 Talasni oblik napona na MOSFET-u APFC-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

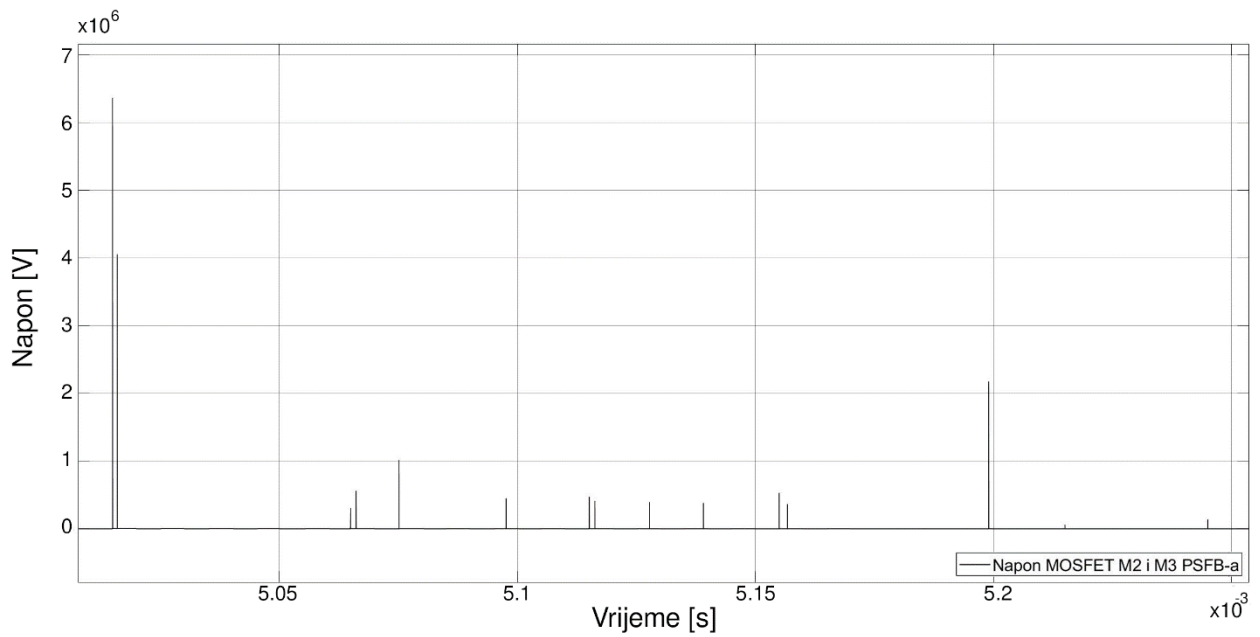


*Slika 5.59 Talasni oblik napona na diodi APFC-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

Sekvencijalni prenaponski udari se prenose ka izlazu punionice odnosno ka invertorskom mostu. Nepovoljna dejstva prenaponskih udara uzrokuju sekvencijalne prenaponske udare i na MOSFET-ovima invertorskog mosta PSFB-a kao što je prikazano na slikama 5.60 i 5.61.

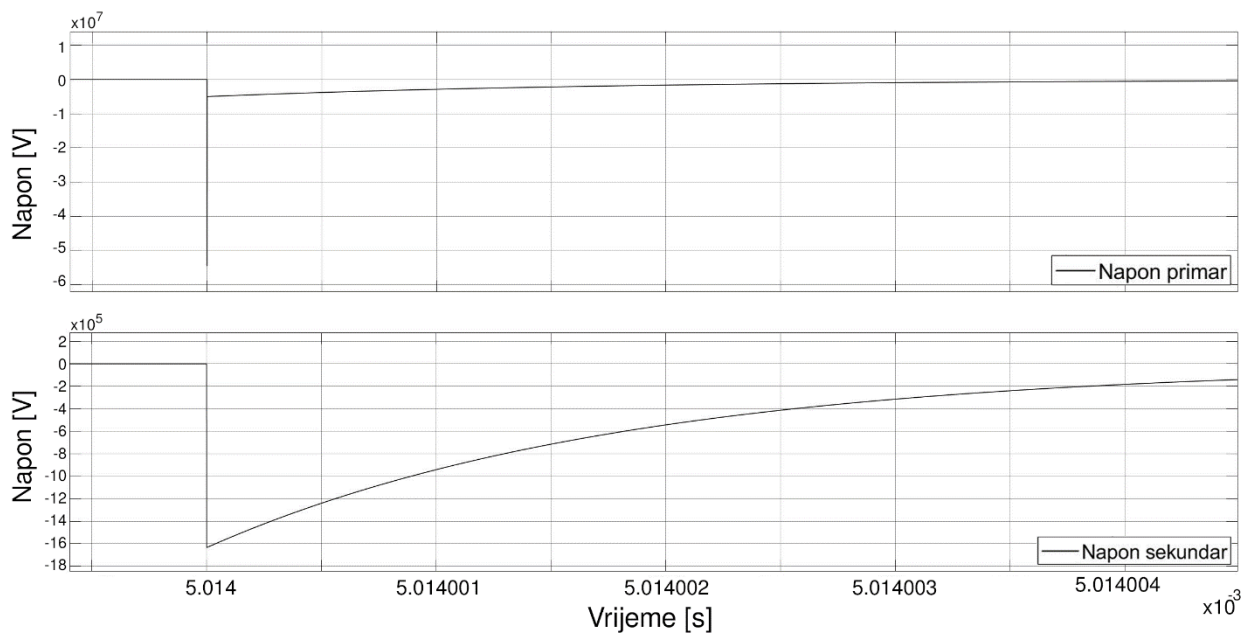


*Slika 5.60 Talasni oblik napona na MOSFET-ovima M1 i M4 PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

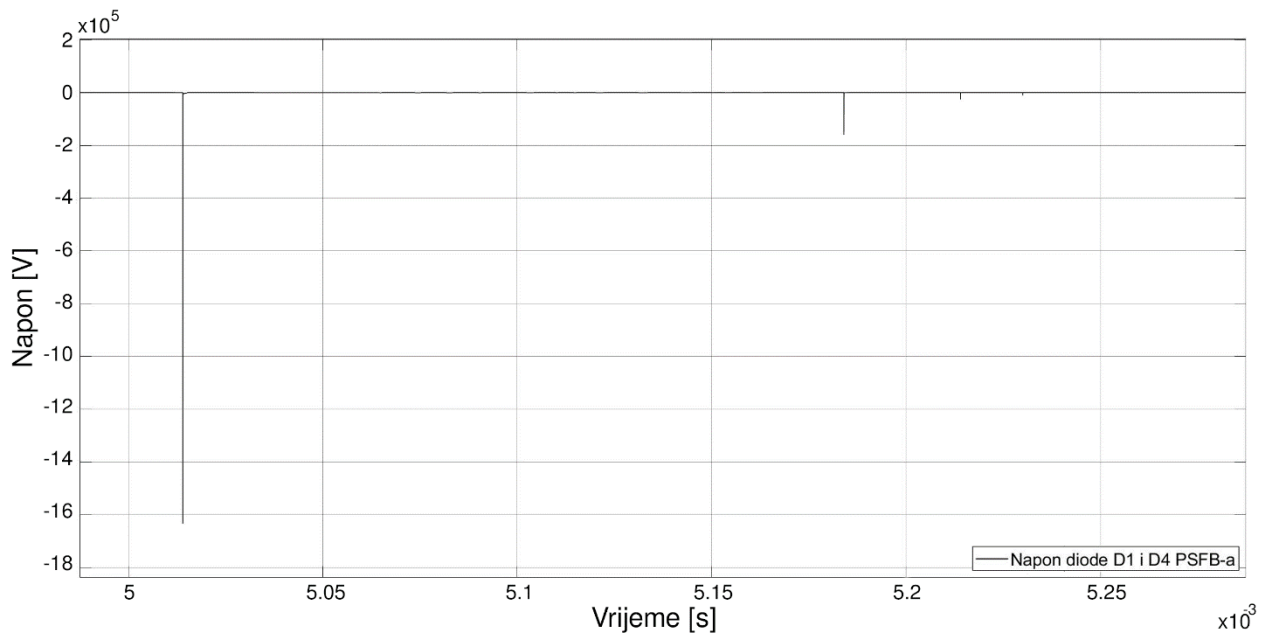


Slika 5.61 Talasni oblik napona na MOSFET-ovima M2 i M3 PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a

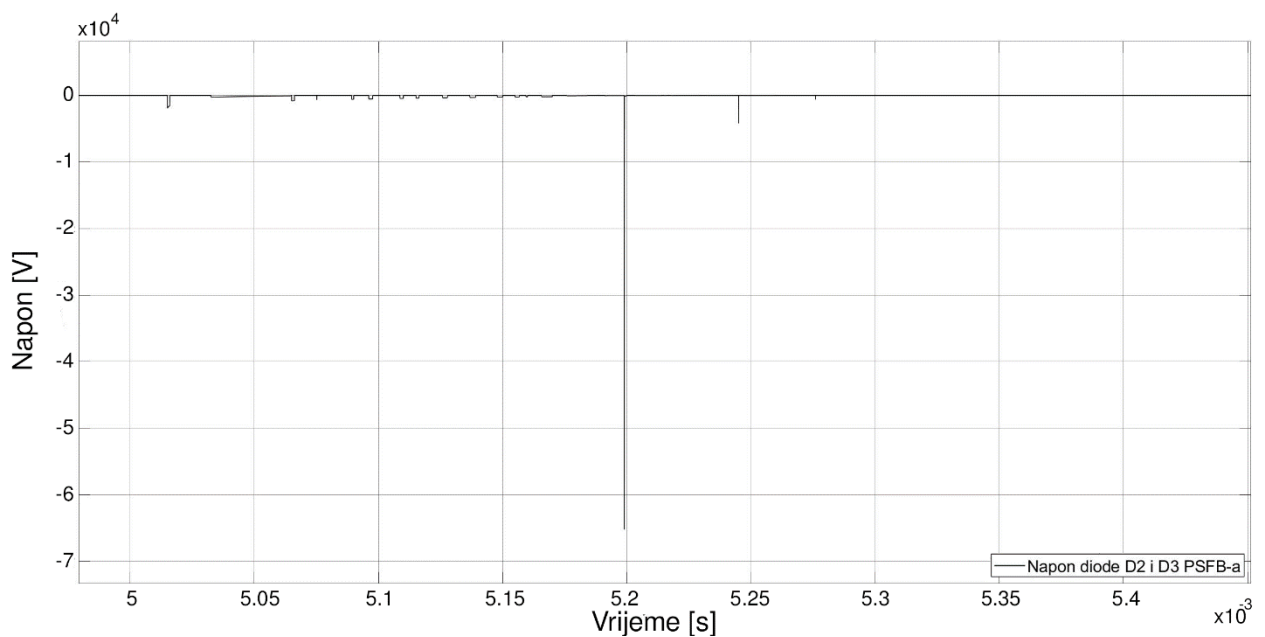
Ekstremno visoke vrijednosti amplitude prenaponskih udara se manifestuju i na primaru linearnog transformatora koji neznatno smanjuje vrijednost amplitude prenaponskih udara (slika 5.62), koji se prenose ka izlazu punionice preko diodnog mostnog ispravljača PSFB-a i uzrokuju identične naponske prilike na diodama diodnog mostnog ispravljača slike 5.63 i 5.64.



Slika 5.62 Talasni oblik napona na linearnom transformatoru PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a



*Slika 5.63 Talasni oblik napona na diodama D1 i D4 diodnog mostnog ispravljača PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

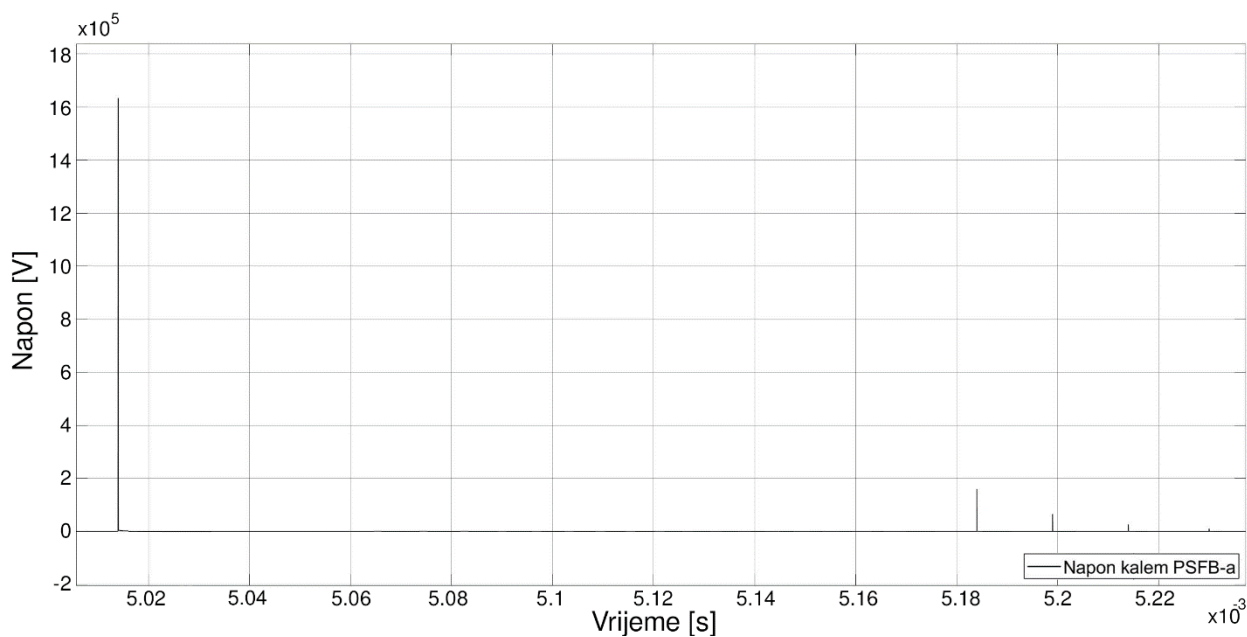


*Slika 5.64 Talasni oblik napona na diodama D2 i D3 diodnog mostnog ispravljača PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

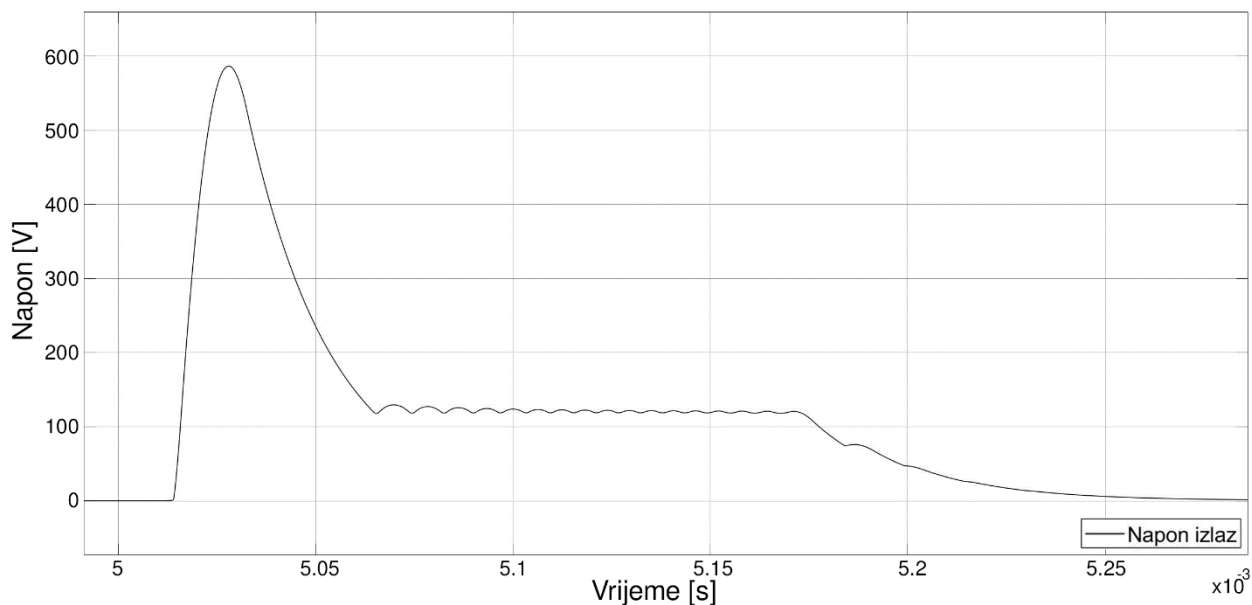
Amplitudna vrijednost naponskog udara na induktivnom elementu filtra PSFB-a ima ekstremno visoku vrijednost (slika 5.65). Pored prethodno analiziranih elemenata punionice za električne automobile, ovo je još jedna od važnih tačaka gdje bi se potencijalno mogao javiti proboj izolacije induktivnog elementa. Naime, induktivni element preuzima višak energije i ekstremno visoku amplitudu prenaponskog udara i tako štiti izlaz punionice za električne automobile gdje se amplituda naponskog talasa približava vrijednosti od 600V (slika 5.66). Ovakav scenario je moguć

samo ukoliko bi induktivni element izdržao prenaponski udarni talas za što postoji minimalna vjerovatnoća kako je amplituda naponskog udarnog talasa  $\sim 1.6\text{MV}$ .

Međutim i u najboljoj situaciji, prikazani napon na izlazu punionice prevazilazi 2.5 puta vrijednost nominalnog napona i u kombinaciji sa strujnim talasnim oblikom koji se pojavljuje na izlazu ima veliki potencijal oštećenja električnog automobila i sistema za upravljanje električnim napajanjem baterijskog sistema ukoliko je električni automobil priključen na mrežu u trenutku atmosferskog pražnjenja.



*Slika 5.65 Talasni oblik napona na kalemu PSFB-a tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*



*Slika 5.66 Talasni oblik napona na izlazu punionice za električne automobile tokom simulacije prekida rada kondenzatora APFC-a*

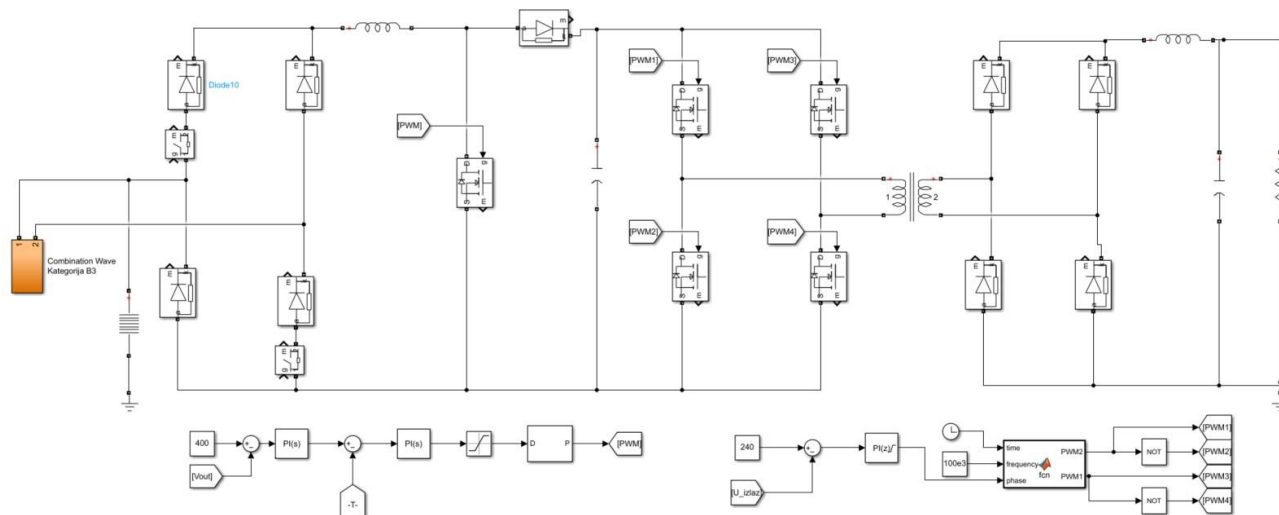
U situaciji oštećenja kapacitivnog elementa APFC-a dolazi do sekvencijalnih prenaponskih udarnih talasa koji se prostiru kroz punionicu za električne automobile i predstavljaju visok rizik za pravilan rad i funkcionisanje punionice za električne automobile, kao i potpuno oštećenje velikog broja komponenti same punionice.

## **5.2.Odvodnik prenapona**

Analiza dobijenih rezultata jasno ukazuje na ozbiljnost situacije i razornih posledica koje se potencijalno mogu dogoditi unutar punionice za električne automobile pri nailasku prenaponskog talasa. Neophodno je pronaći adekvatno rešenje kako bi se ograničile negativne posledice koje su rezultat prenaponskih i strujnih talasa koji se pojavljuju tokom uticaja atmosferskog pražnjenja.

Jedno od rešenja koje je analizirano jeste ugradnja odvodnika prenapona na samom ulazu punionice za električne automobile kako bi se udarni prenaponski talas ograničio i na taj način zaštitile komponente punionice za električne automobile (slika 5.67).

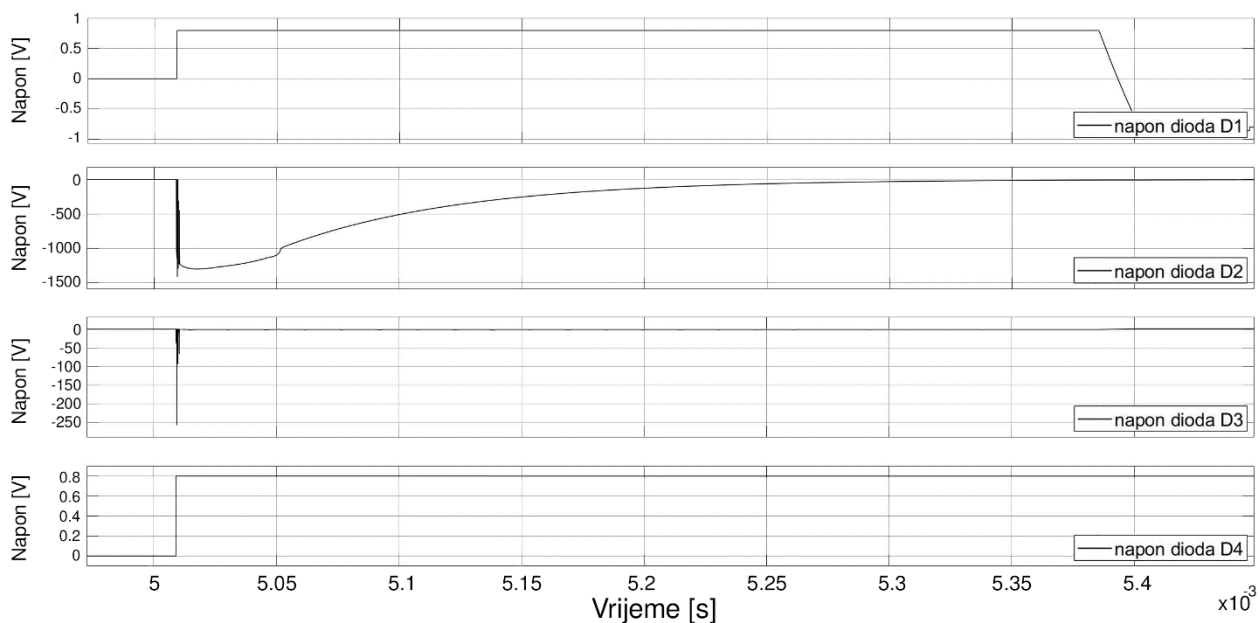




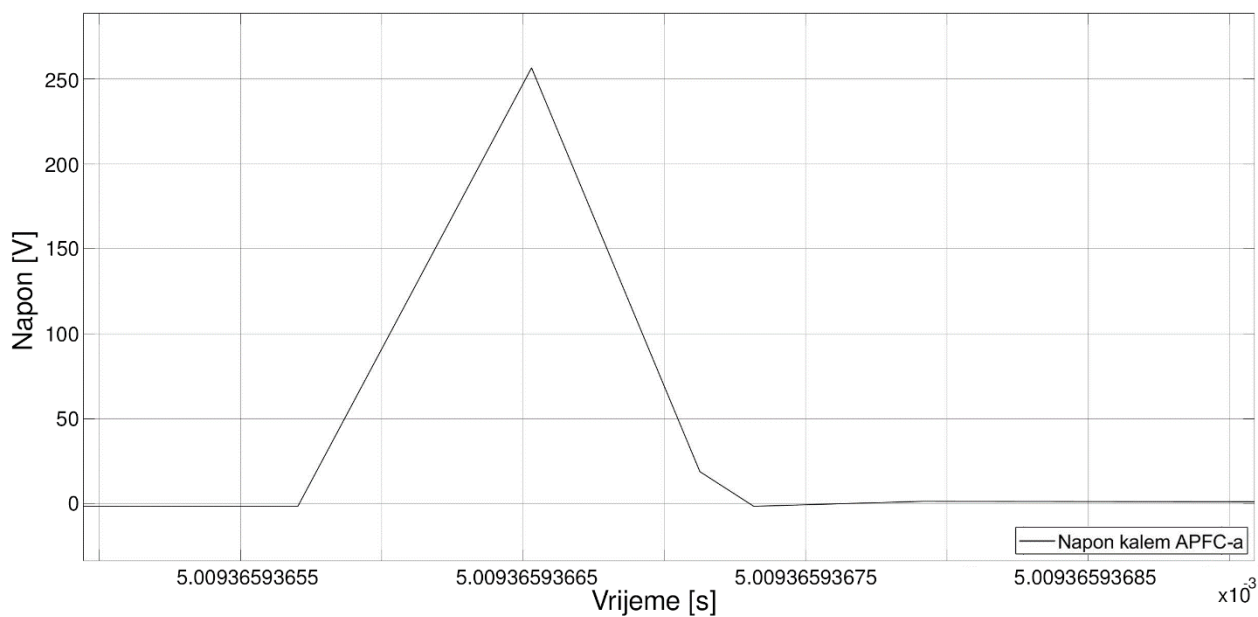
*Slika 5.67 Simulaciona šema punionice za električne automobile sa generatorom prenaponskog talasa i odvodnika prenapona u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK*

Za potrebe ove analize je modelovan odvodnik prenapona (surge arrester) neposredno ispred ulaza u punionicu za električne automobile u grani u kojoj se simulira udar kombinovanog talasa. Odvodnik prenapona je podešen tako da mu je nazivni napon, odnosno napon zaštite  $V_{ref} = 1250V$ . Podešeni parametri odvodnika prenapona pružaju mogućnost kontrole amplitudnih vrijednosti naponskog talasa u granicama koje su potpuno prihvatljive [26]. Naponi na svim komponentama punionice za električne automobile ispunjavaju zahtijevane kriterijume, dok su najviše vrijednosti amplitude talasnog oblika napona na diodama diodnog mostnog ispravljača i induktivnog elementa (kalema) APFC-a (slika 5.68 i 5.69).

Najviša vrijednost napona se može uočiti na diodi D2 diodnog mostnog ispravljača, gdje amplitudna vrijednost napona dostiže maksimalnih 1350V, dok na svim ostalim komponentama je ta vrijednost značajno niža. Amplituda naponskog talasa na diodi D3 diodnog mostnog ispravljača i kalemu APFC-a dostiže maksimalnih 250V, a sve preostale komponente punionice za električne automobile su izložene izuzetno niskim vrijednostima amplitude napona tokom simulacije atmosferskog prenaponskog udara na ulazu punionice za električne automobile.



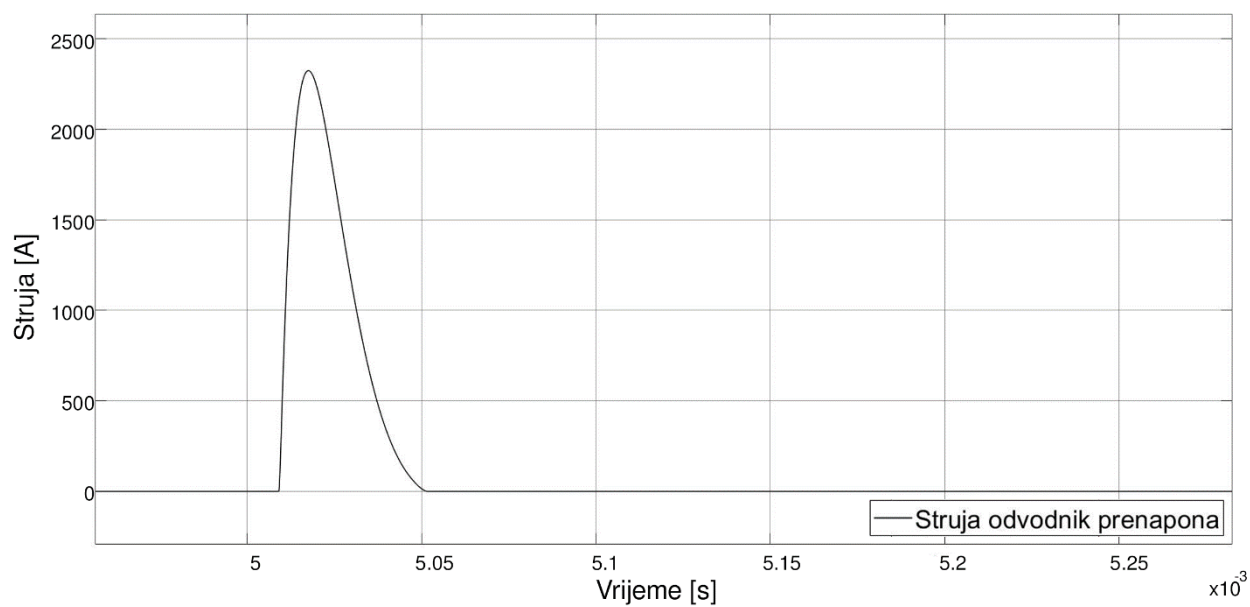
Slika 5.68 Talasni oblik napona na diodama diodnog mostnog ispravljača sa modelovanim odvodnikom prenapona



Slika 5.69 Talasni oblik napona na kalemu APFC-a sa modelovanim odvodnikom prenapona

Na osnovu dobijenih rezultata jasno je da su predloženi parametri za modelovanje odvodnika prenapona potpuno prihvatljivi. Prenapon na induktivnom elementu se ne pojavljuje, šta više amplitudna vrijednost napona dostiže 260V. Struje kroz diode diodnog mostnog ispravljača se očitavaju u miliamperima, što su povoljni rezultati.

Talasni oblik struje koja protiče kroz odvodnik prenapona je prikazan na slici 5.70.



*Slika 5.70 Talasni oblik struje kroz odvodnik prenapona u trenutku simulacije udara kombinovanog talasa*

Amplitudna vrijednost talasnog oblika struje koja protiče kroz odvodnik prenapona je 2300A, stoga je preporuka na osnovu klasifikacije i energetskog naprežanja odvodnika prenapona da se koristi odvodnik koji je dimenzionisan na 5000A.

## 6. ZAKLJUČAK

Punionice za električne automobile predstavljaju ključnu infrastrukturu na putu tranzicije ka održivom i ekološki neutralnom transportnom sistemu. Međutim, nisu imune na uticaje atmosferskog pražnjenja, odnosno na izazove kao što su atmosferski prenaponi. Atmosferski prenaponi i njihov uticaj u NN mreži mogu dovesti do oštećenja opreme i prekida u napajanju. Posledice su visoki troškovi održavanja i smanjenje dostupnosti punionica za električne automobile. Kako bi se smanjio rizik i povećala sigurnost neophodno je izvršiti pažljivu zaštitu punionica za električne automobile.

U ovom radu je izvršena analiza uticaja atmosferskih prenapona na punionice za električna vozila priključene na niskonaponsku mrežu. Za potrebe simulacije atmosferskog pražnjenja je korišćen generator kombinovanog talasa („combination wave“).

Punionica za električne automobile je modelovana u softverskom paketu MATLAB/SIMULINK po uzoru na realne punionice za električne automobile snage 3.8kW. Model punionice može se podijeliti na tri osnovne cjeline: diodni mostni ispravljač na ulazu punionice, APFC (automatski ispravljač faktora snage) i PSFB (fazno pomjerajući mostni konvertor).

Rezultati simulacije pokazuju da kritične vrijednosti amplituda naponskih i strujnih talasa se prvobitno javljaju na diodama diodnog mostnog ispravljača, a zatim i na induktivnom elementu (kalemu) APFC-a. Osim izuzetno visokih vrijednosti naponskih i strujnih talasa neobičan fenomen jeste pojava provođenja sve četiri diode diodnog mostnog ispravljača istovremeno.

Visoke amplitudne vrijednosti talasnog oblika struja ugrožavaju normalan rad punionice za električne automobile, pa je stoga izvršena i dodatna simulacija oštećenja, odnosno prekida rada dioda kroz koje je proticala struja visokog intenziteta. Takve simulacije su pokazale da je moguće da dođe do kaskadnog oštećenja preostalih dioda diodnog mostnog ispravljača, a potencijalno i ostalih komponenti punionice za električne automobile.

Opasniji efekat uticaja atmosferskog pražnjenja na punionice za električne automobile se ogleda u izuzetno visokim vrijednostima amplitude naponskih talasa na elementima punionice. Naime, visoke vrijednosti amplitude naponskog talasa se očitavaju na diodama diodnog mostnog ispravljača i induktivnom elementu (kalemu) APFC-a. Naponski talas dostiže vrijednost i do 5750V što značajno izlazi van dozvoljenih opsega maksimalnog dozvoljenog radnog napona. Ovakve vrijednosti upućuju na moguća oštećenja i/ili proboj/preskok izolacije elemenata

punionice za električne automobile na kojim se uočavaju kritične vrijednosti naponskog talasa. Simulacijom proboja/preskoka elemenata koji su na udaru naponskog talasa dobijaju se rezultati koji upućuju na kaskadna oštećenja preostalih elemenata punionice za električne automobile i nepravilan rad iste.

Kao najopasniji fenomen se uočava proboj/preskok izolacija na induktivnom elementu APFC-a usljed čega se izuzetno visoke vrijednosti strujnog talasa prenose do kapacitivnog elementa (kondenzatora). Simulacijom prekida rada odnosno oštećenja kapacitivnog elementa APFC-a dolazi do niza opasnih stanja unutar punionice za električne automobile. Vrijednosti naponskih i strujnih talasa višestruko prevazilaze kritične vrijednosti i upućuju na potencijalno oštećenje mnogih komponenti punionice za električne automobile. Pored svega, vrijednosti naponskih i strujnih talasa koje se očitavaju na izlazu iz punionice za električne automobile izlaze iz opsega dozvoljenih vrijednosti i potencijalno mogu oštetiti samo električno vozilo čime bi finansijska šteta bila mnogostruko veća.

Dobijeni i analizirani rezultati u ovom radu upućuju na opasnosti koje se mogu javiti unutar punionice za električne automobile ali i na njenom izlazu tokom uticaja atmosferskog pražnjenja. Kako je implementacija ovakvih uređaja sve masovnija, a odabir lokacije veoma stohastičan neophodno je postavljanje adekvatne zaštite kako bi se izbjegla oštećenja na punionici za električna vozila ili samom električnom vozilu, a time i ogromne finansijske posledice. Kao preventivna mjera predlaže se ugradnja odvodnika prenapona referentnog napona  $V_{ref} = 1250V$ . Odvodnik prenapona je postavljen na ulazu punionice za električna vozila u granu u kojoj se simulira udar atmosferskog pražnjenja. Dobijeni rezultati pokazuju da naponske vrijednosti ne prelaze 1500V na elementima punionice za električne automobile, što su prihvatljive vrijednosti prema međunarodnim standardima i ne predstavljaju opasnost ni za opremu ni za korisnike.

## LITERATURA

- [1] Muratori, M., Alexander, M., Arent, D., Bazilian, M., Dede, E., Farrell, J., Gearhart, C., Greene, D., Jenn, A., Keyser, M., Lipman, T., Narumanchi, S., Pesaran, A., Sioshansi, R., Suomalainen, E., Tal, G., Walkowicz, K., & Ward, J. (2021). The rise of electric vehicles—2020 status and future expectations. *Progress in Energy*, 3, 022002. doi: 10.1088/2516-1083/abe0ad
- [2] Roper, W. (2020). “Lithium Battery Prices Plunge” <https://www.statista.com/chart/23807/lithium-ion-battery-prices/>. posjeta: 20.04.2023.
- [3] IEEE Std. C62.41.1: “IEEE Guide on the Surge Environment in Low-Voltage (1000V and Less) AC Power Circuits“, 2002.
- [4] Savić M., Stojković Z. “Tehnika visokog napona – Atmosferski prenaponi”, Elektrotehnički fakultet Beograd, 1996.
- [5] S. Škuletić, N. Kaljević (2019). „Visokonaponska razvodna postrojenja“, Podgorica, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva – Podgorica.
- [6] Martzloff, F. D.: „The Propagation and Attenuation of Surge Voltages and Surge Currents in Low-Voltage AC Power Circuits“, *IEEE Transactions PAS-102*, no. 5, May 1983.
- [7] Martzloff, F. D., Gauper, H. A.: „Surge and high-frequency propagation in industrial power lines“, *IEEE Transactions on Industrial Applications-22*, no. 4, July/Aug. 1986.
- [8] IEC Std. 60664-1: „Insulation coordination for equipment within low-voltage systems –Part 1: Principles, requirements and tests“, 2002.
- [9] Mansoor, A., and Martzloff, F. D.: „Driving High Surge Currents into Long Cables: More Begets Less“, *IEEE Transactions Power Delivery Vol. 12*, no. 3, July 1997.
- [10] Martzloff, F. D.: „Coupling, Propagation, and Side Effects of Surges in an Industrial Building Wiring System“, *IEEE Transactions Industrial Application Vol. 26*, no. 2, Mar./Apr. 1990.
- [11] Wernström, H., Broms, M., and Boberg, S.: „Transient Overvoltages on AC Power Supply Systems in Swedish Industry“, Report FOA E 30002-E2, Foorsvarets Forskningsanstaldt, Huvudavdelning 3, Sweden, 1984.
- [12] Meissen, W.: „Überspannungen in Niederspannungsnetzen - Overvoltages in low-voltage networks“, *ETZ Bd. 104*, 1983.

[13] Standler, R. B.: „Protection of Electronic Circuits from Overvoltages“ New York: Wiley-Interscience, 1989.

[14] IEEE Std. C62.41.2: “IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits, 2002.

[15] Berger, K., Anderson, R. B., Kröninger, H.: „Parameters of Lightning Flashes“, ELECTRA No. 41, 1975., pp. 23-37.

[16] Anderson, R. B., Eriksson, A. J.: „Lightning Parameters for Engineering Application“, ELECTRA No. 69, 1980, pp. 65-102.

[17] Hasse, P.: „Characteristics of Direct Strike Lightning Events and Risk Assessment“, PEG 2001 Meeting, Las Vegas, March 27-29, 2001.

[18] V. Radulovic and S. Skuletic, "Influence of Combination Wave Generator's Current Undershoot on Overvoltage Protective Characteristics," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 1, pp. 152-160, Jan. 2011.

[19] "IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000 V and less) AC Power Circuits," in IEEE Std C62.45-2002 (Revision of IEEE Std C62.45-1992) , vol., no., pp.1-96, 11 April 2003, doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94255.

[20] International Electrotechnical Commission. (2005). IEC 61000-4-5:2005: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test.

[21] "Electric Vehicle Charger Selection Guide" (2018). California Energy Commission. Funding provided by CEC-ARV-14-046 and CEC-ARV-14-058 grants from the California Energy Commission, with additional support from the City of Mount Shasta and the Siskiyou County Economic Development Council.

[22] Liu, Zi. (2016). "Design of Single Phase Boost Power Factor Correction Circuit and Controller Applied in Electric Vehicle Charging System."

[23] Azazi, H.Z., EL-Kholy, E.E., Mahmoud, S.A., & Shokralla, S.S. (2010). Review of Passive and Active Circuits for Power Factor Correction in Single Phase, Low Power AC-DC Converters.

[24] Kumar, Santhosh. (2017). "Design and Simulation Analysis of Power Factor Correction Using Boost Converter with IC UC3854."

[25] Mendoza-Varela, I.A., Alvarez-Diazcomas, A., Rodriguez-Resendiz, J., & Martinez-Prado, M.A. (2021). Modeling and Control of a Phase-Shifted Full-Bridge Converter for a LiFePO<sub>4</sub> Battery Charger. *Electronics*, 10(21), 2568. <https://doi.org/10.3390/electronics10212568>

[26] International Standard IEC 60664-1:2020 “Insulation coordination for equipment within low-voltage supply systems - Part 1: Principles, requirements and tests”, TC 109 - Insulation co-ordination for lowvoltage equipment, Ed. 3.0, 2020.

[27] IDW80C65D1, "Emitter-Controlled Diode, Rapid 1, Common Cathode Series Datasheet." Rev. 2.1, 2014-12-10.

[28] Rodriguez, A., Sebastian, J., Lamar, D.G., Hernando, M.M., Ayarzagüena, I., Larrazabal, I., Ortega, D., Bermejo, J.M., Vazquez, F. (2022). An Overall Analysis of the Static Characteristics of the Single Active Bridge Converter. *Electronics*, 11(4), 601. <https://doi.org/10.3390/electronics11040601>

[29]Ozpineci, B., Tolbert, L.M., Islam, S.K., et al. (2002). "Testing, characterization and modelling of SiC diodes for transportation applications." In *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1673-1678.

[30] Type 944L Low Inductance DC Link Capacitors for Fast-switching Inverter Applications Datasheet