

UDK: 621.314.24

Miroslav Popović¹, Aleksandar Milić¹, Nikola Mirković²

Modelovanje gubitaka GaN prekidača na osnovu kataloških podataka

¹ Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija*² Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” AD, Beograd, Srbija

Originalni naučno-istraživački rad

Ključne poruke

- Izvođenje algoritma za ocenu gubitaka GaN prekidača snage
- Poređenje tvrdih, mekih i polumekih prekidačkih procesa i izdvajanje strujnog doprinosa kanala i parazitnih kapacitivnosti
- Verifikacija modela kroz prototip sinhronog spuštača napona snage 1 kW

Kratak sadržaj

Prekidači zasnovani na savremenim poluprovodnicima velikog energetskeg procesa, kao što je galijum-nitrid (GaN), sve češće se koriste u uređajima energetske elektronike. Zbog specifične strukture i sposobnosti da brzo menjaju radno stanje, standardni proračuni koji se koriste za određivanje gubitaka u silicijumskim prekidačima nisu primenljivi u ovom slučaju. Stoga je razvijen analitički model za procenu gubitaka kod GaN prekidača u konfiguraciji polumosta, koji se oslanja na podatke iz tehničke dokumentacije. Model uzima u obzir različite tipove komutacija, kao što su tvrdo, meko i polumeko komutovanje. Izvršeno je poređenje gubitaka pri mekom i tvrdom komutovanju prekidača u sklopu sinhronog spuštača napona. Na osnovu predloženog modela određena su vremena trajanja komutacija, koja su iskorišćena kako bi se verifikovao predloženi model na pretvaraču spuštaču napona snage 1 kW.

Ključne reči

GaN prekidači snage, model gubitaka, sinhroni spuštač napona

Napomena:

Ovaj članak predstavlja proširenu, unapređenu i dodatno recenziranu verziju studentskog rada „Analitički model gubitaka GaN tranzistora na osnovu podataka iz tehničke dokumentacije” (<https://doi.ub.bg.ac.rs/doi/cigre37-b4-05/>), nagrađenog u Studijskom komitetu STK-B4 HVDC i energetska elektronika, na 37. Savetovanju CIGRE Srbija, Zlatibor, 26-30. maja 2025.

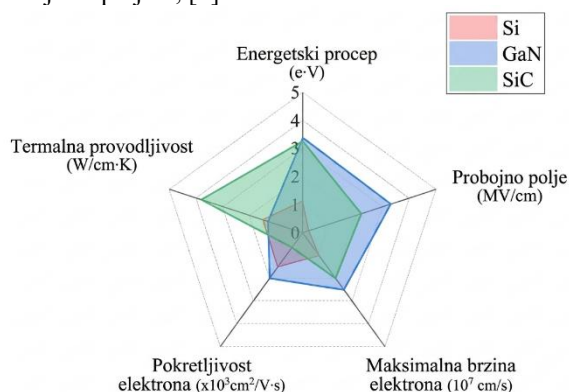
Primljeno: 16. decembar 2025. Recenzirano: 3. jul 2026.
Izmenjeno: 8. jul 2026. Odobreno: 22. jul 2026.

* Korespondirajući autor: Miroslav Popović

Imejl: miroslav@etf.bg.ac.rs

1. UVOD

Višedecenijski napredak u razvoju uređaja energetske elektronike doveo je do skoro potpunog iskorišćenja potencijala prekidača snage zasnovanih na silicijumskoj (Si) tehnologiji. Zbog toga je dalji razvoj pretvarača koji se oslanjaju na ovu vrstu poluprovodnika postao znatno složeniji. Međutim, pojava prekidača koji koriste poluprovodnike sa visokim energetske procepmom, kao što su galijum-nitrid (GaN) i silicijum-karbid (SiC), omogućila je dizajn novih topologija, kao i postizanje veće efikasnosti i manjih dimenzija pretvarača, [1]. Kao što je prikazano na Slici 1, GaN poluprovodnici u poređenju sa Si i SiC, odlikuju se većom elektronskom pokretljivošću, većom maksimalnom brzinom elektrona i većim probojnim poljem, [1].



Slika 1. Uporedna analiza poluprovodničkih tehnologija, [1]

S obzirom na to da GaN materijal ima znatno veći energetski procep i probajno polje u odnosu na silicijumske poluprovodnike, omogućen je dizajn kraćeg provodnog kanala unutar prekidača za istu vrednost probajnog napona. Kraći provodni kanal, zajedno sa većom gustinom pakovanja GaN prekidača, dovodi do manjeg otpora provodnog kanala i smanjenih parazitnih kapacitivnosti. Navedene osobine pružaju manju snagu gubitaka tokom procesa uključivanja i isključivanja prekidača, što omogućava postizanje značajno većih prekidačkih učestanosti, [2].

Da bi se iskoristio pun potencijal GaN prekidača, potrebno je napraviti pouzdan fizički model koji opisuje proces prekidanja, radi određivanja ukupnih gubitaka snage i maksimalne učestanosti prekidanja. Do sada razvijeni modeli prekidanja za Si prekidače nisu primenljivi na GaN uređaje, budući da je hemijska i fizička struktura ovih prekidača drugačija, [2], [3]. Proces prekidanja kod GaN prekidača i Si prekidača, iako na prvi pogled sličan, znatno se razlikuje. Galijum-nitridna tehnologija omogućava veću brzinu prekidanja, pri čemu uticaj nelinearnih parazitnih kapacitivnosti postaje značajan i ne može se zanemariti. Uz to, principi provođenja i uspostavljanje provodnog kanala razlikuju se u poređenju sa silicijumskim prekidačima. U [4] prikazan je deo po deo linearni model gubitaka. Ovakav pristup omogućava brzu i jednostavnu ocenu gubitaka, ali ne uvažava nelinearnu zavisnost parazitnih kapacitivnosti od korespondirajućih napona, usled čega dolazi do značajnih

grešaka u proceni pri učestanostima prekidanja u oblasti od nekoliko stotina kiloherca. Detaljniji model gubitaka predstavljen je u [5] i uvažava nelinearnu zavisnost parazitnih kapacitivnosti, ali zanemaruje nelinearnu zavisnost transkonduktanse GaN prekidača snage. Imajući u vidu navedena ograničenja, u ovom radu razvijen je analitički model prekidanja GaN prekidača koji istovremeno uvažava nelinearne zavisnosti parazitnih kapacitivnosti i transkonduktanse, te omogućava precizno određivanje ukupnih gubitaka snage na prekidaču u poređenju sa trenutno dostupnim rešenjima u literaturi. Razvijeni model se zasniva na neaproximiranim podacima iz tehničke dokumentacije proizvođača i uzima u obzir fizičku strukturu prekidača.

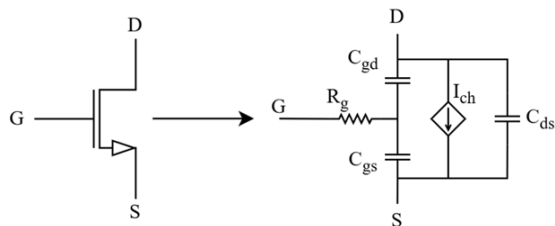
U Poglavlju 2 opisan je model GaN prekidača i fizičke zavisnosti između modelovanih elemenata. Prilikom modelovanja, radi preciznijeg određivanja gubitaka, ukupna struja prekidača podeljena je na dva doprinosa – struju provodnog kanala i struju parazitnih kapacitivnosti. Naime, tokom komutacije ne protiče celokupna struja isključivo kroz provodni kanal prekidača snage. Značajan deo struje, posebno u fazama prelaza, odvaja se na punjenje i pražnjenje parazitnih kapacitivnosti uređaja, što direktno utiče na dinamičko ponašanje prekidača i utiče na ukupne komutacione gubitke. Zbog toga je ova podela, pored uvažavanja nelinearnih kapacitivnosti i transkonduktanse GaN prekidača snage, ključna za realistično modelovanje i tačnu ocenu energetskih gubitaka tokom rada prekidača, [2]. Takođe, uključivanje i isključivanje prekidača podeljeno je u segmente i detaljno je opisano za prekidače u konfiguraciji polumosta. Za odabrani prekidač u Poglavlju 3 prikazano je izdvajanje relevantnih podataka iz tehničke dokumentacije i prikazan je algoritam za ocenu gubitaka. Na samom kraju, eksperimentalni rezultati, koji potvrđuju pouzdanost modela, dati su u Poglavlju 4.

2. MODEL PREKIDAČA I KOMUTACIONOG PROCESA

Prekidači snage zasnovani na GaN tehnologiji, iako po svojoj strukturi podsećaju na Si MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) uređaje, poseduju određene specifičnosti koje značajno utiču na njihovo ponašanje prilikom prekidanja. U ovom poglavlju detaljno je opisan električni model GaN prekidača sa akcentom na ključne razlike u odnosu na klasične silicijumske MOSFET prekidače. Za potrebe analitičkog modelovanja i proračuna gubitaka snage na prekidačima dati su i detaljno opisani teorijski i analitički procesi prekidanja za slučaj uključivanja i isključivanja prekidača u polumosnoj konfiguraciji. Kao rezultat dobija se sistem diferencijalnih jednačina putem kojeg se mogu odrediti vremenski oblici struje kanala $I_{ch}(t)$ i napona kanala $v_{ds}(t)$ potrebni za proračun gubitaka tokom procesa uključivanja i isključivanja prekidača. Model GaN prekidača prikazan je na Slici 2 i u velikoj meri odgovara modelu Si MOSFET prekidača.

Glavna razlika ogleda se u odsustvu ugrađene diode za provođenje struje u suprotnom smeru. Zbog svoje simetrične strukture, prilikom provođenja struje u suprotnom smeru drejn (*drain*) i sors (*source*) elektrode menjaju svoju ulogu. Potencijal drejn elektrode je sada niži od gejt (*gate*) potencijala, tako da sada napon v_{gd} diktira

provodnost kanala i omogućava prekidaču da provodi struju. U daljem tekstu ovaj mehanizam provođenja biće nazvan inverzno provođenje GaN prekidača.

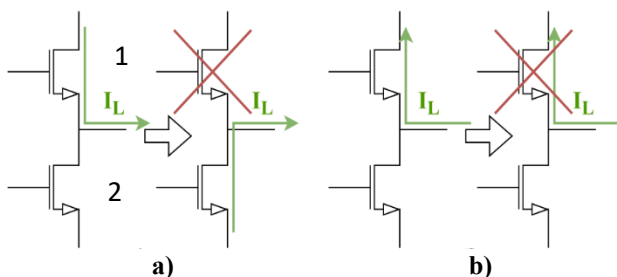


Slika 2. Model GaN prekidača

2.1 Prekidački proces prekidača snage u polumosnoj konfiguraciji

Dva prekidača u polumosnoj konfiguraciji predstavljaju univerzalnu prekidačku ćeliju u savremenim energetskim pretvaračima snage, [1]. Iako ova konfiguracija nije prisutna u doslovno svakoj topologiji, većina praktičnih arhitektura pretvarača snage može se razložiti na ćelije u polumosnoj konfiguraciji ili na neke njihove proširene varijante, [6]. U ovom potpoglavlju biće izveden i detaljno objašnjen proces prekidanja dva GaN prekidača u polumosnoj konfiguraciji. Na osnovu izvedenog modela, u Poglavlju 3 biće projektovan algoritam za ocenu gubitaka na prekidačima.

Prekidanje prekidača u polumosnoj konfiguraciji predstavlja proces prebacivanja struje sa jednog prekidača na drugi. Da bi se sprečio kratak spoj (*shoot-through*) između gornjeg i donjeg prekidača u polumostu, uvodi se koncept mrtvog vremena (*dead time*). To je kratak vremenski razmak između trenutka isključenja jednog prekidača i trenutka uključivanja drugog prekidača. Mrtvo vreme osigurava da prvi prekidač u potpunosti bude isključen pre nego što se pošalje signal za uključivanje drugog prekidača, čime se efikasno sprečava pojava provođenja struje kroz oba prekidača. Prekidački proces u polumosnoj konfiguraciji uslovljen je radnim režimom pretvarača, to jest smerom struje kroz prekidač koji se isključuje. Mogu se izdvojiti dve različite vrste prekidanja, pri čemu se osnovna razlika između njih ogleda u smeru struje kroz kanal prekidača I_L u trenutku prekidanja, kao što je prikazano na Slici 3.



Slika 3. Vrste prekidanja za različit smer struje:
a) „pozitivan” smer struje; b) „inverzan” smer struje

Prva vrsta prekidanja prikazana je na Slici 3a i podrazumeva da je struja postojala u smeru od drejna ka sorsu prekidača u trenutku isključenja. Na Slici 3a dat je primer isključenja gornjeg prekidača u polumostu. Nakon isključenja provodnog prekidača struja prelazi na suprotni prekidač u polumostu. Ova vrsta isključenja u literaturi je poznatija kao tvrdo isključenje. Kako se struja ne može trenutno prekinuti, jednovremeno sa opisanim procesom suprotni prekidač označen brojem 2 na Slici 3 preuzima trenutnu jačinu struje i to kroz njegove parazitne kapacitivnosti, budući da smer struje to omogućava. Posle potpunog pražnjenja parazitne kapacitivnosti C_{ds} , prekidač 2 provodi struju putem inverznog mehanizma provođenja i taj proces traje dok ne istekne ostatak mrtvog vremena. Kada mrtvo vreme istekne, ovaj prekidač može biti uključen u uslovima nultog napona. Ova pojava naziva se meko uključanje, budući da je protok struje opterećenja prirodno ispraznio parazitnu kapacitivnost C_{ds} , [1]. Zaključujemo da je prva vrsta prekidanja određena smerom struje od drejna ka sorsu prekidača koji se isključuje i karakteriše je sekvenca tvrdo isključenje – meko uključanje.

Druga vrsta prekidanja (Slika 3b), podrazumeva da je struja kroz poluprovodnički uređaj koji se isključuje imala smer od sorsa ka drejnu, pri čemu struja posle isključenja nastavlja da prolazi kroz isti prekidač putem inverznog provođenja GaN prekidača. Ovakvo isključenje prekidača u literaturi je poznato kao meko isključenje. Bezgubitnim ili mekim procesom se smatra samo prelazak iz regularnog mehanizma provođenja u inverzni mehanizam provođenja, ali se nadalje kondukcion gubici povećavaju usled porasta napona v_{sd} . U ovom slučaju, kapacitivnost C_{ds} drugog prekidača nije ispražnjena tokom mrtvog vremena jer nema potrebne količine usmerenog naelektrisanja koje bi to omogućilo, kao u prvom slučaju. Uključenje prekidača koje sledi nakon isteka preostalog mrtvog vremena naziva se tvrdo uključanje. Zaključujemo da je druga vrsta prekidanja određena smerom struje od sorsa ka drejnu prekidača koji se isključuje i karakteriše je sekvenca meko isključenje – tvrdo uključanje.

Obe vrste prekidačkog procesa date su na primeru isključenja gornjeg – uključivanja donjeg prekidača u polumostu, ali se bez gubitka opštosti mogu izvesti isti zaključci za suprotnu sekvencu, prateći smer struje kroz provodni prekidač.

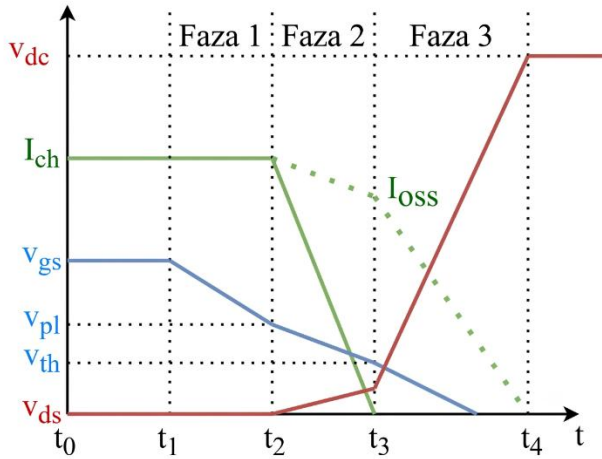
Za oba slučaja razmatra se GaN model prikazan na Slici 2. Tokom prekidačkog procesa, prekidač radi u omskom režimu rada. U tom režimu, provodni kanal se može modelovati kao kontrolisani izvor struje I_{ch} , gde je vršna vrednost struje I_{ch} povezana sa naponom v_{gs} preko transkonduktanse g_m . Prilikom svih opisanih prekidačkih procesa pretpostavljeno je da se izlazna struja polumosta I_L ne menja i da ostaje konstantna tokom trajanja procesa prekidanja. U narednim odeljcima detaljno će biti opisan proces uključivanja, kao i isključenja prekidača snage.

2.2 Isključenje prekidača

Proces isključivanja GaN prekidača snage opisan je posebno za prvu i drugu vrstu prekidanja. Svaki od ovih procesa isključenja razdvojen je na specifične faze kako bi se omogućila precizna analiza ponašanja prekidača i gubitaka u prelaznom stanju. Na ovaj način, moguće je razumeti dinamiku uređaja i kasnije optimizovati upravljačke signale za postizanje maksimalne efikasnosti.

2.2.1 Prva vrsta prekidanja – tvrdo isključenje

Kao što je objašnjeno u Odeljku 2.1, isključenje prekidača tokom prve vrste prekidanja podrazumeva da prekidnu struju I_L preuzima drugi prekidač u polumostu. Ovaj slučaj podeljen je na tri faze kao što je prikazano na Slici 4. Do ovakve vrste prekidanja dolazi kada je struja I_L pozitivna, to jest ima smer od drejna ka sorsu provodnog prekidača.



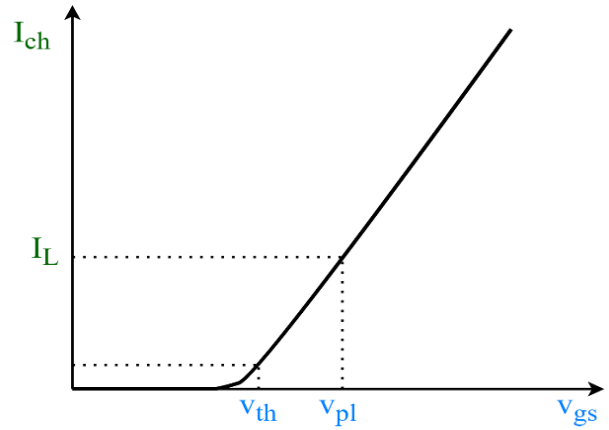
Slika 4. Prva vrsta prekidanja – tvrdo isključenje

Tokom prve faze upaljač je dobio naredbu za isključenje i počinje da smanjuje napon v_{gs} . Napon v_{gs} menja svoju vrednost po sledećem zakonu:

$$v_{gs} = v_{dr_on} \cdot e^{-\frac{t}{R_e C_{gs}}}, \quad (1)$$

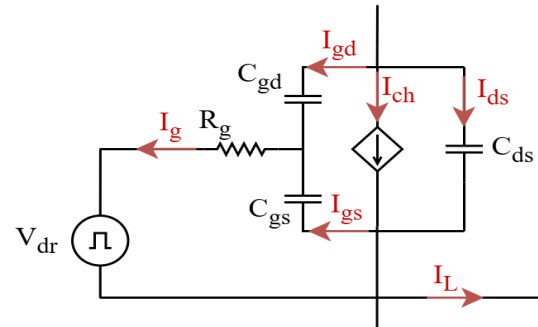
gde je v_{dr_on} napon uključenja prekidača koji daje upaljač, a R_e ukupna otpornost upaljačkog kola i predstavlja zbir sopstvene otpornosti gejta tranzistora, eksternog otpornika upaljačkog kola i izlazne otpornosti upaljača.

Tokom ove faze kroz provodni kanal prekidača prolazi konstantna struja $I_{ch} = I_L$. Prekidač se sve vreme tokom prve faze nalazi u zasićenju, tako da struja kanala ne zavisi od napona v_{gs} . U trenutku kada se napon v_{gs} izjednači sa naponom Milerovog platoa v_{pl} , gde je v_{pl} napon koji odgovara struji I_L na prenosnoj karakteristici prekidača prikazanoj na Slici 5, završava se prva faza. U tom trenutku prekidač izlazi iz zasićenog radnog režima i počinje da radi u omskoj oblasti gde je struja kanala I_{ch} direktno srazmerna naponu gejta, v_{gs} .



Slika 5. Strujno-naponska karakteristika GaN prekidača

Tokom druge faze napon v_{gs} nastavlja da opada, ali je njegovo smanjivanje usporeno jer upaljač u ovom trenutku počinje da puni parazitnu kapacitivnost C_{gd} , kao što je prikazano na Slici 6.



Slika 6. Smerovi struja u modelu GaN prekidača prilikom druge faze

Diferencijalna jednačina koja opisuje promenu v_{gs} data je sa (2), [7]:

$$\frac{dv_{gs}}{dt} = \frac{I_g}{C_{gd} + C_{gs}} - \frac{C_{gd}}{C_{gd} + C_{ds}} \cdot \frac{(I_L - I_{ch})}{2} \cdot \frac{1}{(C_{gd} + C_{gs})}, \quad (2)$$

dok se struja kanala I_{ch} menja nelinearno sa promenom v_{gs} i to po krivoj prikazanoj na Slici 5. Bitno je naglasiti da sve parazitne kapacitivnosti prekidača, kao što su C_{gs} , C_{gd} i C_{ds} , nisu konstantne, već predstavljaju nelinearne funkcije odgovarajućih napona. Zbog toga je, za preciznu analizu u svakom trenutku, neophodno poznavati trenutne vrednosti napona v_{gs} , v_{ds} i v_{gd} kako bi se tačno odredile vrednosti ovih kapacitivnosti. Pošto je vrednost v_{gs} poznata u svakom trenutku, potrebno je odrediti i v_{ds} i v_{gd} . Napon $v_{ds}(t)$ može se odrediti rešavanjem sledeće diferencijalne jednačine, [1]:

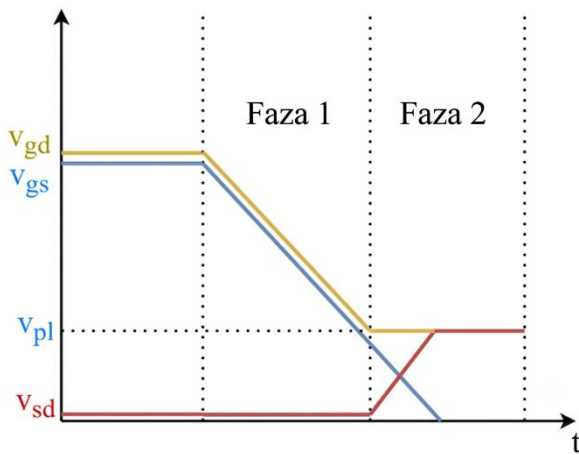
$$\frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{I_L - I_{ch}}{C_{oss1} + C_{oss2}}, \quad (3)$$

gde su C_{oss1} i C_{oss2} izlazne kapacitivnosti prekidača i predstavljaju zbir C_{ds} i C_{gd} . Napon v_{gd} dobija se kao razlika napona v_{gs} i v_{ds} . Druga faza traje dok struja kanala I_{ch} ne padne na nulu, tačnije dok napon v_{gs} ne dostigne napon praga provođenja v_{th} .

Tokom treće faze provodni kanal prekidača je zatvoren, ali ukupna struja kroz prekidač je različita od nule i to sve dok se ne napune parazitne kapacitivnosti C_{ds} i C_{gd} . Jednačine navedene za drugu fazu i dalje važe s tim da je sada $I_{ch} = 0$.

2.2.2 Druga vrsta prekidanja – meko isključenje

Tokom druge vrste prekidanja (Slika 3b), aktivni prekidač se isključuje, ali celokupna struja nastavlja da protiče kroz njega procesom inverznog provođenja GaN prekidača. Ovaj proces predstavlja prelazak prekidača iz zasićenog režima rada u inverzni režim provođenja, prikazan je na Slici 7 i podeljen je u dve faze.



Slika 7. Druga vrsta prekidanja – meko isključenje

Do ove vrste prekidanja može doći samo ako je struja I_L negativna, to jest ako ima smer od sorsa ka drejnu provodnog prekidača (Slika 3b). Prilikom ove vrste prekidanja napon v_{sd} ne raste do napona v_{dc} već do napona inverznog provođenja GaN prekidača. Za uređaje male snage ovaj napon iznosi nekoliko volti.

Prva faza je identična kao kod prvog slučaja i njegove prve faze opisane u Potpoglavlju 2.2.1, tako da se napon v_{gs} menja po zakonu opisanom u jednačini (1). Napon v_{gd} tokom ove faze jednak je zbiru napona v_{gs} i v_{sd} . Pad napona na provodnom kanalu v_{sd} tokom ove faze je konstantan i jednak je proizvodu otpornosti provodnog kanala R_{ds_on} i struji kanala I_{ch} .

Druga faza počinje kada napon v_{gd} dostigne Milerov plato v_{pl} , to jest napon koji odgovara struji I_L na prenosnoj karakteristici datoj na Slici 3. Posle tog trenutka, napon v_{gd} ostaje konstantan. Napon v_{gs} nastavlja da se menja po jednačini (2). Pošto je napon v_{gd} konstantan a napon v_{gs} opada, pad napona na provodnom kanalu prekidača v_{sd} tokom ove faze će rasti i može se odrediti preko sledeće jednačine:

$$v_{sd} = v_{gd} + v_{sg} \quad (4)$$

2.3 Uključenje prekidača

Prilikom uključenja prekidača snage ponovo se razlikuju dve vrste prekidanja – kada struja I_L ima pozitivan (od drejna ka sorsu) i kada ima inverzan (od sorsa ka drejnu) smer (Slika 2). Svaki od navedenih procesa je, slično analizi isključenja, podeljen na faze. Podela na faze

omogućava precizno razumevanje dinamike uređaja tokom prelaska iz isključenog u uključeno stanje, što će kasnije biti neophodno za tačnu procenu prekidačkih gubitaka i optimizaciju performansi.

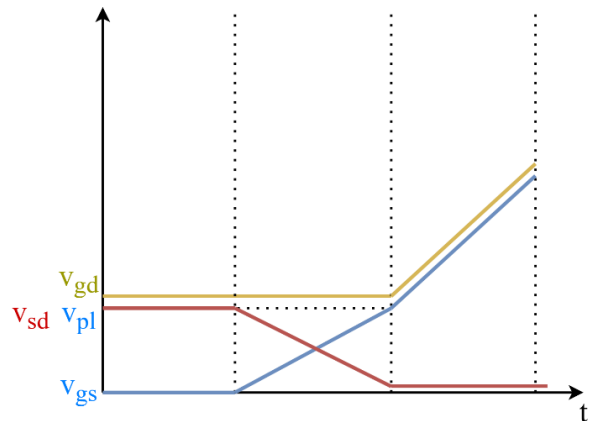
2.3.1 Prva vrsta prekidanja – meko uključenje

Tokom uključenja prekidača prilikom prve vrste prekidanja (Slika 3a), podrazumeva se da su njegove parazitne kapacitivnosti C_{ds} i C_{gd} ispražnjene (tokom isključenja suprotnog prekidača) i da kroz prekidač putem inverznog provođenja prolazi struja jačine I_L . Ovaj slučaj podeljen je u dve faze kao što je prikazano na Slici 8.

Tokom prve faze napon v_{gd} je konstantan i odgovara naponu Milerovog platoa za struju I_L , dok se napon v_{gs} povećava i to po jednačini:

$$v_{gs} = v_{dr_on} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{eC_{gs}}}} \right) \quad (5)$$

U trenutku kada napon v_{gs} dostigne napon Milerovog platoa za struju I_L , inverzno provođenje GaN prekidača prestaje i sada je aktivna oblast u potpunosti provodna i dozvoljava prolazak struje u oba smera. Tokom druge faze napon v_{gs} nastavlja da raste po dinamici prikazanoj u (5) i dostiže vrednost v_{dr_on} .

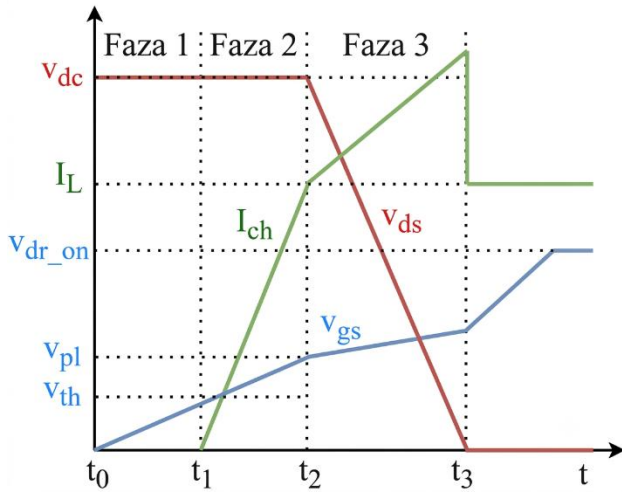


Slika 8. Prva vrsta prekidanja – meko uključenje

2.3.2 Druga vrsta prekidanja – tvrdo uključenje

Tokom uključenja prekidača prilikom druge vrste prekidanja, Slika 3b, parazitne kapacitivnosti C_{ds} i C_{gd} nisu prethodno ispražnjene, kao u prethodnom slučaju, tako da ih je potrebno ispražniti tokom prekidačkog procesa. Uključenje se u ovom slučaju odvija u tri faze, prikazane na Slici 9.

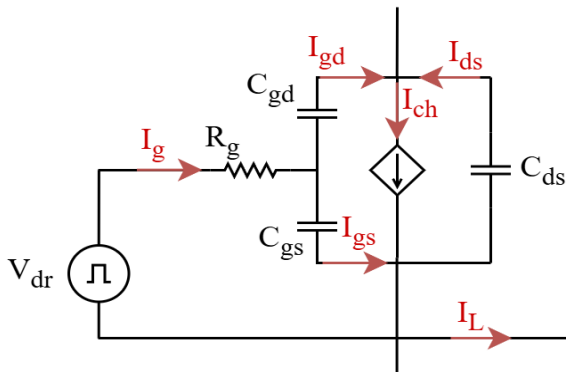
Tokom prve faze napon v_{gs} raste do napona praga provođenja prekidača v_{th} . I tokom prve i tokom druge faze napon v_{gs} se menja po jednačini (5). U trenutku kada struja kroz aktivnu oblast prekidača krene da raste počinje druga faza.



Slika 9. Druga vrsta prekidanja – tvrdo uključenje

Tokom druge faze napon v_{gs} raste od napona praga provođenja v_{th} do napona Milerovog platoa v_{pl} koji odgovara struji I_L , dok struja raste od nulte vrednosti do I_L . Veza između napona v_{gs} i struje I_L data je na Slici 2. Dok prekidač koji se uključuje ne preuzme svu struju sa prekidača koji je u inverznom mehanizmu provođenja, ne može da dođe do pada napona v_{ds} . Razlog zbog čega dolazi do ove pojave krije se u samom inverznom mehanizmu provođenja koji ne dozvoljava padu napona na svojoj aktivnoj oblasti da se menja dokle god postoji neka inverzna struja koja protiče kroz kanal.

Tokom treće faze, parazitne kapacitivnosti C_{ds} i C_{gd} se prazne i to strujom kroz aktivni kanal prekidača, kao što je prikazano na Slici 10.



Slika 10. Smerovi struja u modelu GaN prekidača prilikom druge vrste prekidajčkog procesa – uključenje

Tokom ove faze dolazi do značajnog povećanja struje aktivne oblasti prekidača I_{ch} , tako da je i naprezanje koje poluprovodnik trpi značajno veće od napora ustaljenog radnog režima. Struja kroz aktivnu oblast I_{ch} i dalje je povezana sa naponom v_{gs} preko grafika datog na Slici 10.

Brzina promene napona v_{gs} sada je znatno usporena jer struja koju daje upaljač ne puni samo kapacitivnost C_{gs} već i prazni kapacitivnost C_{gd} . Promena napona v_{gs} data je, [7], pomoću:

$$\frac{dv_{gs}}{dt} = \frac{I_g}{C_{gd} + C_{gs}} - \frac{C_{gd}}{C_{gd} + C_{ds}} \cdot \frac{(I_{ch} - I_L)}{2} \cdot \frac{1}{(C_{gd} + C_{gs})}, \quad (6)$$

dok se promena napona v_{ds} odvija po jednačini:

$$\frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{I_{ch} - I_L}{C_{oss1} + C_{oss2}}. \quad (7)$$

Rešavanjem sistema diferencijalnih jednačina (1) – (7) i uzimanjem u obzir da su vrednosti svih parazitnih kapacitivnosti funkcije napona na njima, dobijaju se vremenski oblici struje $I_{ch}(t)$ i napona $v_{ds}(t)$. Vremenski oblici struje $I_{ch}(t)$ i napona $v_{ds}(t)$ potrebni su kako bi se precizno odredili gubici na prekidačima.

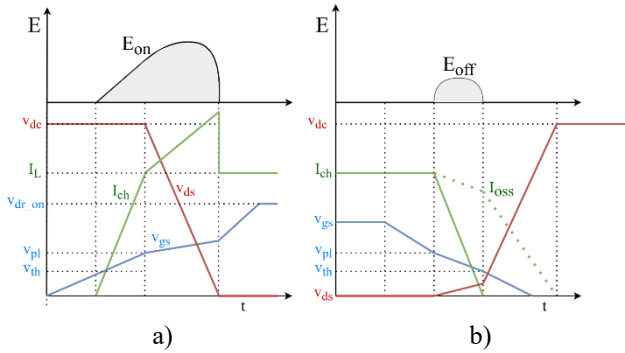
3. PRORAČUN GUBITAKA

Ključni pokazatelji performansi jednog pretvarača snage su efikasnost, veličina i cena. Efikasnost se može povećati odabirom GaN poluprovodničkih komponenti sa boljim statičkim i dinamičkim karakteristikama od konvencionalnih Si prekidača. Bolje dinamičke karakteristike omogućavaju rad na većim frekvencijama, što dovodi do smanjenja potrebnih dimenzija pasivnih komponenti kao što su transformatori, prigušnice i kondenzatori, [4]. Da bi se u potpunosti iskoristile prednosti GaN prekidača, neophodno je razviti pouzdan model za proračun gubitaka. Na osnovu takvog modela moguće je odrediti koji GaN prekidač je najpodobniji za konkretnu primenu, da li je potrebno dodatno hlađenje, koji tip hlađenja je adekvatan, kao i maksimalnu radnu učestanost prekidanja pretvarača. U ovom poglavlju biće razrađen model za ocenu gubitaka na osnovu prethodno izvedenih relacija i informacija sakupljenih iz tehničke dokumentacije prekidača.

Gubici u prekidačima tokom jednog prekidajčkog ciklusa obuhvataju: gubitke pri uključanju, gubitke pri isključanju, gubitke u gejt petlji, gubitke tokom provođenja struje i gubitke usled mehanizma inverznog provođenja. Na Slici 11 prikazani su talasni oblici energije gubitaka pri tvrdom uključanju i isključanju prekidača. Bitno je uočiti da je preklapanje struje i napona značajno izraženije prilikom uključanja prekidača, zbog čega je i energija gubitaka pri uključanju veća nego pri isključanju. U određenim topologijama, u kojima se mogu realizovati dva prekidajčka prelaza prve vrste (Slika 3a), a koje karakteriše sekvenca mekog uključanja i tvrdog isključanja u okviru jedne periode prekidanja, moguće je u velikoj meri smanjiti ukupne prekidajčke gubitke. U tom slučaju, tokom jedne periode dobijaju se dva meka uključanja i dva tvrda isključanja. Ovakva sekvenca je karakteristična za LLC rezonantne pretvarače, koji primenom GaN prekidača mogu postići veoma visoke efikasnosti u poređenju sa drugim izolovanim DC/DC topologijama. Iako je ovaj režim rada uobičajen za LLC pretvarače, moguće ga je realizovati i u sinhronom spuštaču napona, pod uslovima koji će biti detaljno razmotreni u Poglavlju 3.2.

Ukupni komutacioni i kondukcionni gubici mogu se izraziti kao proizvod struje koja teče kroz provodni kanal prekidača i pada napona na njemu:

$$P_{total} = \frac{1}{T_{PWM}} \int_0^{T_{PWM}} I_{ch}(t) \cdot v_{ds}(t) \cdot dt. \quad (8)$$



Slika 11. Energija gubitaka prilikom tvrdog a) uključenja
b) isključenja

Da bi se ocenila snaga gubitaka na prekidaču, potrebno je odrediti vremenske talasne oblike veličina od značaja u funkciji radnih režima. Kako bi se odredili vremenski oblici struje kanala $I_{ch}(t)$ i pada napona na kanalu $v_{ds}(t)$, potrebno je rešiti sistem diferencijalnih jednačina kojim je rezultovalo Poglavlje 2. Da bi sistem jednačina (1) – (7) bio rešiv, potrebno je poznavati sledeće zavisnosti:

$I_{ch}(v_{gs})$ – zavisnost struje aktivne oblasti prekidača od napona v_{gs} ;

$I_{ch}(v_{gd})$ – zavisnost struje aktivne oblasti prekidača od napona v_{gd} prilikom inverznog provođenja struje;

$C_{ds}(v_{ds})$ – zavisnost kapacitivnosti drejn–sors od pada napona na aktivnoj oblasti prekidača v_{ds} ;

$C_{gd}(v_{gd})$ – zavisnost kapacitivnosti gejt–drejn od napona v_{gd} ;

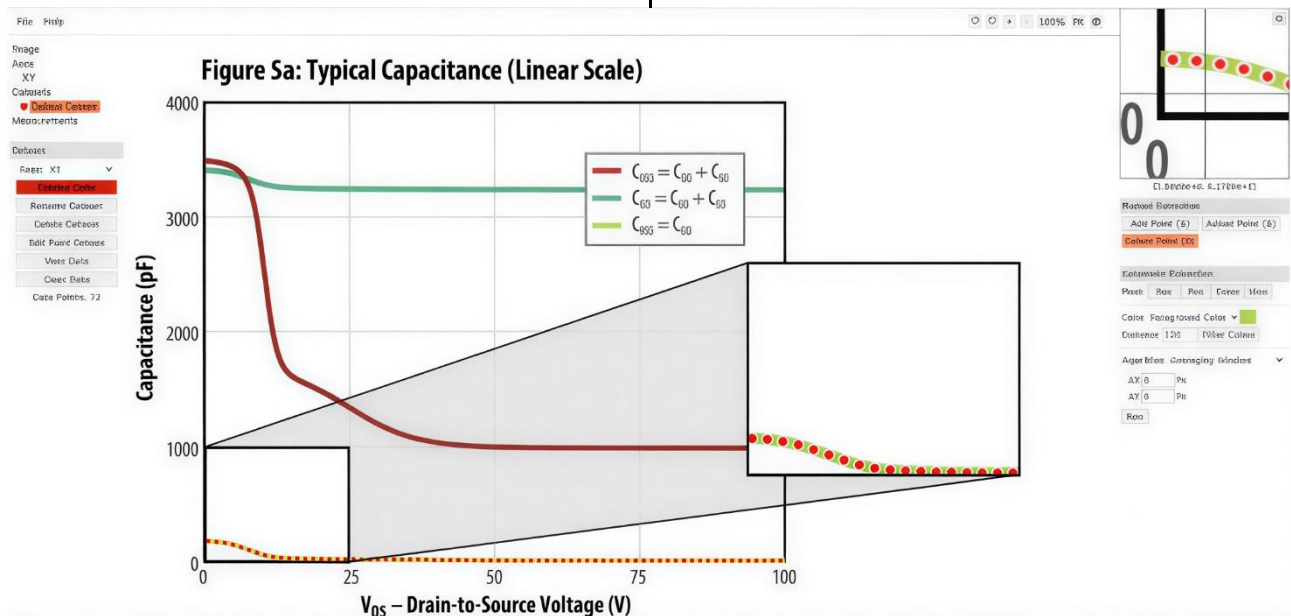
$C_{gs}(v_{gs})$ – zavisnost kapacitivnosti gejt–sors od napona v_{gs} .

Prethodno navedene zavisnosti mogu se precizno odrediti eksperimentalnim metodama, kao što je test dvostrukog uključenja (*Double-pulse test*). Međutim, ovaj pristup često nije praktičan jer podrazumeva nabavku komponente i sprovođenje svih merenja kako bi se proverila njena pogodnost za određenu primenu. Alternativni načini uključuju upotrebu aproksimacionih izraza, prilagođavanje krivih ili, u slučaju parazitnih kapacitivnosti, primenu modela zasnovanog na naelektrisanjima (*charge-based model*). Iako merenja zavisnosti predstavljaju najpouzdaniji izvor podataka, do njih se najteže dolazi, dok aproksimacione metode često dovode do značajnih odstupanja.

Zbog toga je u ovom radu primenjen drugačiji pristup. Na osnovu krivih datih u tehničkoj dokumentaciji prekidača, korišćenjem softverskog paketa *Automeris* određene su diskretne vrednosti traženih veličina. Iz ovih diskretnih zavisnosti i diferencijalnih jednačina dobijenih diskretizacijom izraza (1) – (7), moguće je odrediti talasne oblike $I_{ch}(t)$ i $v_{ds}(t)$.

3.1 Prikupljanje podataka iz tehničke dokumentacije

Podaci u tehničkoj dokumentaciji prekidača najčešće su predstavljeni u obliku grafika, koji su dobijeni na osnovu merenja koja je proizvođač sproveo i potom prikazao u tehničkoj dokumentaciji. Ukoliko proizvođač ne raspolaže tabelarnim vrednostima traženih zavisnosti ili nije voljan da ih podeli, neophodno je izvršiti izdvajanje podataka direktno sa grafika iz tehničke dokumentacije. U ovom radu taj postupak je realizovan korišćenjem softverskog paketa [8]. Primer korišćenja ovog alata dat je na Slici 12.



Slika 12. Korišćenje alata za izdvajanje podataka iz tehničke dokumentacije

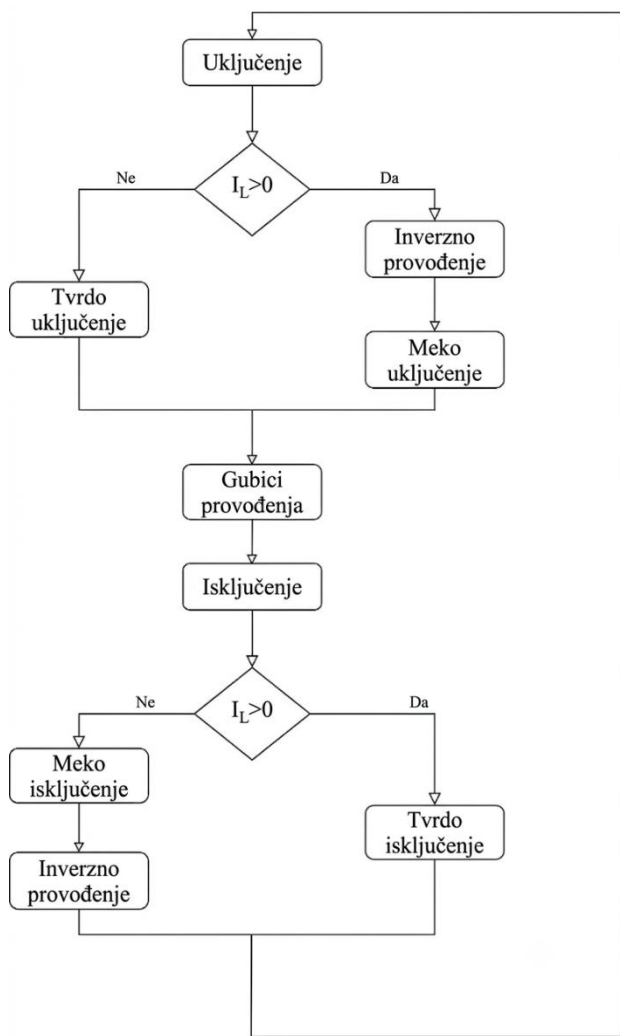
Ovaj softverski paket namenjen je digitalizaciji grafičkih podataka, odnosno izdvajanju numeričkih vrednosti sa slika grafika. Ovaj alat omogućava korisniku da na jednostavan način iz postojećih dijagrama dobije tabelarne podatke pogodne za dalju analizu i proračun. Slika prikazuje promenu parazitnih kapacitivnosti izvučenih

iz tehničke dokumentacije komercijalno dostupnog GaN prekidača u zavisnosti od napona drejn–sors v_{ds} . Softverski paket je korišćen da bi se u više od 100 tačaka procenile diskretne vrednosti kapacitivnosti, koje su označene crvenim tačkama, čime je obezbeđena visoka tačnost prikazane zavisnosti.

3.2 Algoritam za ocenu gubitaka

Na osnovu diferencijalnih jednačina izvedenih u Poglavlju 2 i podataka sakupljenih iz tehničke dokumentacije moguće je oceniti gubitke disipirane na prekidačima. Kako bi se odredilo radno stanje prekidača i vrsta prekidačkog procesa koja se realizuje, u svakom trenutku je potrebno poznavati struju polumosta I_L . Struja I_L ne zavisi direktno od vrste prekidača već od spoljnih parametara električnog kola kao što su napon jednosmernog kola i vrednosti pasivnih elemenata ili aktivnog opterećenja. Poznavanjem struje I_L na osnovu algoritma prikazanog na Slici 13 moguće je odrediti stanja kroz koja prolazi prekidač tokom jednog perioda prekidanja. Pod pozitivnim smerom struje smatra se struja koja ima smer od drejna ka sorsu, dok je negativan smer struje od sorsa ka drejnu.

Rezultat algoritma jesu diskretne vrednosti pada napona na provodnom kanalu $v_{ds}(k)$ i struje provodnog kanala $I_{ch}(k)$, te se gubici na tom prekidaču tokom jedne periode određuju na osnovu diskretizovane jednačine (9).



Slika 13. Stanja kroz koja prolazi jedan prekidač u polumostu tokom jednog ciklusa prekidanja

$$P_{total} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} I_{ch}(k) \cdot v_{ds}(k) \quad (9)$$

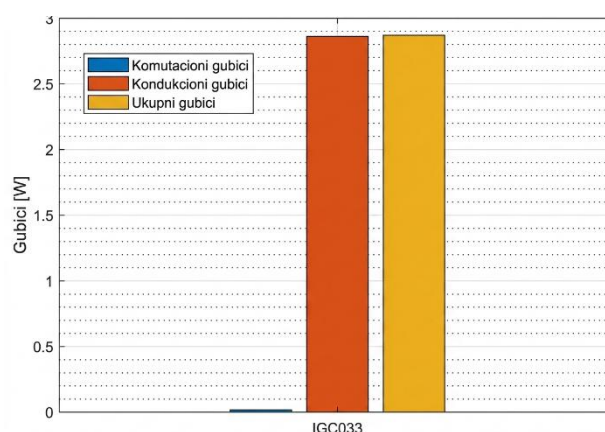
3.3 Ocena gubitaka

U ovom poglavlju izvršena je analiza i procena prekidačkih gubitaka za izabrani GaN prekidač u polumosnoj konfiguraciji. Gubici su određeni i međusobno upoređeni za dve različite vrednosti talasnosti struje, sa ciljem da se sagleda uticaj različitih sekvenci prekidačkih stanja na ukupnu disipaciju snage. U tu svrhu razvijena su skripta u programskom paketu [9], koja su omogućila rešavanje sistema diferencijalnih jednačina dobijenih diskretizacijom izraza (1) – (7) korišćenjem Ojlerove diskretizacione metode prvog reda. Stanja sistema su određena primenom algoritma prikazanog na Slici 13, čime je omogućeno proučavanje gubitaka prekidača u različitim radnim režimima pretvarača.

Procena gubitaka izvršena je pri sledećim uslovima. Snaga pretvarača određena je da bude $P = 1$ kW, ulazni napon je $V_{in} = 60$ V i faktor ispune $d = 0,75$, dok su ostali parametri od značaja dati u Tabeli I. Ukupni gubici na oba prekidača u polumosnoj konfiguraciji dati su na Slici 14, za slučaj kada je talasnost struje veća od njene srednje vrednosti.

Tabela I Parametri dizajniranog spuštača napona

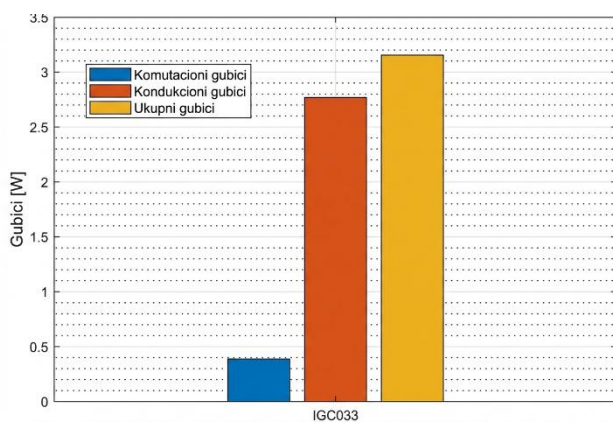
Parametar	Vrednost	Jedinica
Ulazni napon	10–72	V
Izlazni napon	5–70	V
Nominalna snaga	1	kW
Učestanost prekidanja	125	kHz
Mrtvo vreme	25	ns
Prigušnica	1,5	μH
Prekidač	GaN [10]	/
Upaljač	[11]	/



Slika 14. Ukupni gubici na oba prekidača u polumosnoj konfiguraciji

Sa grafika se odmah primećuje da su komutacioni gubici zanemarljivo mali u odnosu na kondukcione gubitke. U ovom radnom režimu izlazna struja je približno $I_L = 22$ A, dok je amplituda talasnosti struje, maksimalna devijacija u odnosu na srednju vrednost, 27 A. Zbog ovako velike talasnosti prilikom gašenja donjeg prekidača struja je negativna i iznosi $I_{L_min} = -5$ A. Tada se to isključenje odvija

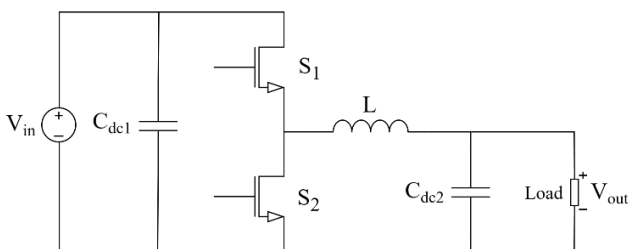
po scenariju opisanom u 2.2.1. Sa Slike 3 može se uočiti da je preklapanje struje $I_{ch}(t)$ i napona $v_{ds}(t)$ vrlo malo, te su i gubici definisani jednačinom (8) vrlo mali. Posle isključenja donjeg prekidača nastupa period mrtvog vremena i uključanje gornjeg prekidača. Uključenje gornjeg prekidača se odvija po scenariju opisanom u 2.3.1 i takođe stvara minimalne gubitke. Bitno je naglasiti da kada dođe do komutacije isključenje gornjeg – uključanje donjeg, ona se odvija ponovo po scenariju 2.2.1, pa 2.3.1 i rezultuje minimalnim komutacionim gubicima. Kombinacija komutacije 2.2.1 i 2.3.1 može se ostvariti dva puta tokom jedne periode samo ukoliko je struja prilikom uključanja gornjeg prekidača negativna, to jest ako je talasnost struje veća od struje potrošača I_L . Ukupni gubici na oba prekidača u slučaju kada je talasnost struje manja od struje potrošača I_L prikazani su na Slici 15. Gubici u ovom slučaju su za 10% sada veći.



Slika 15. Ukupni gubici na oba prekidača u polumosnoj konfiguraciji pri tvrdom komutovanju

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Kako bi se ispitao i verifikovao načinjeni analitički model, isprojektovan je pretvarač spuštač napona snage 1 kW (Slika 16). Prilikom projektovanja i izrade prototipa, rasporedu komponenata na štampanoj ploči posvećena je posebna pažnja kako bi se minimizirali paraziti elementi upaljačkog kola i njihov uticaj na prekidački proces. Ključni podaci koji opisuju prototip pretvarača dati su u Tabeli I. Validacija opisanog modela komutacija eksperimentalno je vršena na postavci datoj na Slici 17.

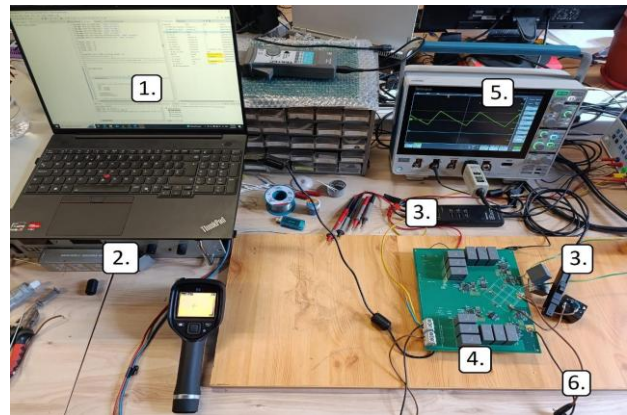


Slika 16. Topologija projektovanog spuštača snage

Postavku čine:

- (1) laptop za komunikaciju sa pretvaračem u realnom vremenu;
- (2) energetska napajanje;

- (3) naponske i strujne sonde propusnog opsega do 150 MHz;
- (4) razvijeni prototip pretvarača;
- (5) osciloskop;
- (6) pasivni potrošač otpornosti $R_L = 2 \Omega$.



Slika 17. Eksperimentalna postavka u Laboratoriji za digitalno upravljanje pretvaračima i pogonima Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Postoji više načina za verifikaciju komutacionog modela i algoritma za ocenu gubitaka. Jedan od pristupa je merenje ukupnih gubitaka na nivou celog pretvarača, nakon čega se vrši njihova raspodela na gubitke u bakarnim provodnicima, reaktivnim elementima i pomoćnoj elektronici. Oduzimanjem ovih komponenata od ukupne disipacije moguće je indirektno proceniti gubitke na prekidačima. Međutim, u dizajniranom pretvaraču prekidački gubici čine relativno mali udeo u ukupnim gubicima, što ovaj metod čini podložnim značajnim greškama i odstupanjima.

Zbog toga je primenjen drugi pristup – direktna procena tačnosti komutacionog modela kroz upoređivanje talasnih oblika napona $v_{ds}(t)$ i struje $I_{ch}(t)$. Kako su ove dve veličine usko povezane, dobro poklapanje talasnih oblika napona podrazumeva i dobro poklapanje struje, te samim tim i adekvatnu procenu prekidačkih gubitaka.

Izvršen je niz eksperimenata u kojima je ulazni napon menjan u opsegu od $V_{in} \in [10, 60] V$ sa korakom 10 V, dok je istovremeno faktor ispunje uzimao vrednosti od $d \in [0,25; 0,5; 0,75]$. Otpornost pasivnog potrošača fiksirana je tokom svih eksperimenata i iznosi 2Ω .

Ključni parametar za verifikaciju razvijenog modela je vreme trajanja komutacije. Trajanje komutacije ispitivano je na postavci prikazanoj na Slici 16 pri različitim radnim režimima i dalje poređeno sa rezultatima analitičko-numeričkog modela. Uz pomoć osciloskopa, izmereno je vreme potrebno naponu $v_{ds}(t)$ da se promeni sa 0 V na V_{dc} , prilikom isključenja donjeg prekidača (Slika 18).

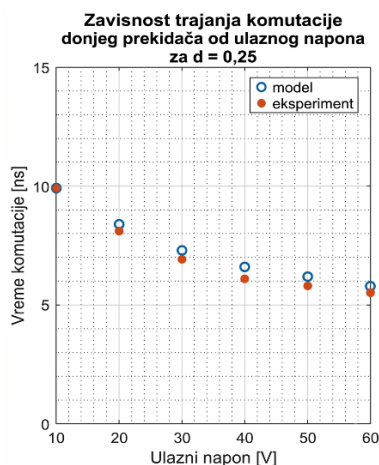
Izmerena su vremena trajanja komutacija za donji i gornji prekidač za šest različitih ulaznih napona. Eksperimentalni rezultati su upoređeni sa vremenima trajanja komutacija dobijenih iz modela u celom radnom opsegu napona pretvarača. Dobijeni rezultati predstavljeni su na Slici 19.

Sa Slike 19 može se zaključiti da razvijeni model prilično dobro prati eksperimentalne vrednosti, naročito u slučaju donjeg prekidača. Na naponu od 10 V model

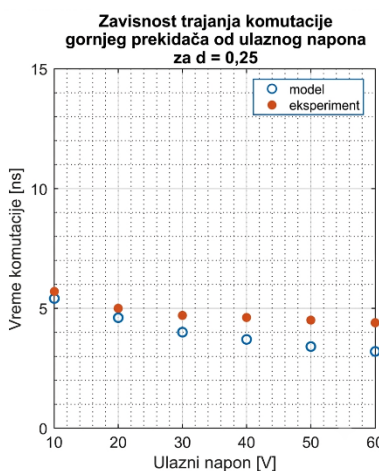
pokazuje gotovo idealno poklapanje sa merenjima, sa tačnošću od 99%. Međutim, kako se ulazni napon povećava, uočava se određeno odstupanje modela, pri čemu je najveća razlika uočena na 40 V, gde tačnost opada na 92%.



Slika 18. Promena napona v_{ds} prilikom isključenja donjeg prekidača



a)



b)

Slika 19. Zavisnost dužine trajanja komutacije od ulaznog napona: a) donjeg prekidača; b) gornjeg prekidača u polumostu

S druge strane, rezultati za gornji prekidač pokazuju nešto slabije poklapanje sa eksperimentom. Tačnost modela opada sa porastom ulaznog napona, dostižući 75% na 60 V. Ovo može ukazivati na dodatne nelinearne efekte ili asimetriju u uticaju parazitnih elemenata koji nisu u potpunosti obuhvaćeni trenutnim modelom. Uprkos odstupanjima, model pokazuje zadovoljavajuću tačnost, što ga čini korisnim alatom za procenu vremena komutacije i ocenu gubitaka na prekidačima.

5. ZAKLJUČAK

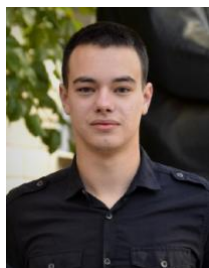
U radu su detaljno opisani procesi komutacija GaN prekidača u polumosnoj konfiguraciji. Izveden je fizički model komutacija čiji su izlazni parametri vremenski oblik struje kanala $I_{ch}(t)$ i vremenski oblik pada napona na kanalu $v_{ds}(t)$. Parametri od interesa opisani su u funkciji radnih režima. Kako bi izvedene jednačine bile rešive bez ikakvog uvođenja aproksimacija, uz pomoć odgovarajućeg softverskog paketa, izvučeni su relevantni podaci iz tehničke dokumentacije konkretnog prekidača. Tako izvučeni podaci iskorišćeni su prilikom diskretnog rešavanja jednačina prethodno opisanog fizičkog modela. Za potrebe verifikacije formiranog analitičko-numeričkog modela, razvijen je i ispitani prototip pretvarača spuštača napona zasnovan na GaN tehnologiji. Ispitivanja su sprovedena u celom opsegu radnog napona i poređena su trajanja vremena komutacije kojima rezultuju model i eksperimentalna postavka. Model pokazuje veoma dobro poklapanje od preko 92% sa eksperimentalnim ispitivanjima trajanja komutacije GaN prekidača. Najveća odstupanja između rezultata dobijenih analitičko-numeričkim modelom i eksperimentalno izmerenih vremena komutacije na prototipu dostižu do 25% za gornji prekidač, što ukazuje na prisustvo određenih efekata koji nisu u potpunosti obuhvaćeni modelom i ostavlja prostor za dalja istraživanja.

LITERATURA

- [1] Lidow A., De Rooij M., Glaser J., „GaN Power Devices for Efficient Power Conversion”, četvrto izdanje knjige, Wiley, Hoboken, 2025.
- [2] Spaziani L., Lu L., „Silicon, GaN and SiC: There's Room for All: An Application Space Overview of Device Considerations”, *2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Chicago, IL, USA, 2018, pp. 8-11, DOI: 10.1109/ISPSD.2018.8393590.
- [3] Ding X., Zhou, Y., Cheng, J., „A Review of Gallium Nitride Power Device and its Applications in Motor Drive” *Proceedings of the CSEE*, vol. 41, no. 4, pp. 1386–1397, April 2021.
- [4] Klein J., „Synchronous Buck MOSFET Loss Calculations with Excel Model” [Internet]. Sunnyvale: Fairchild Semiconductor; 2006 [citirano 5. 1. 2026]. Dostupno na: <https://www.bdtic.com/datasheet/fairchild/AN-6005.pdf>.

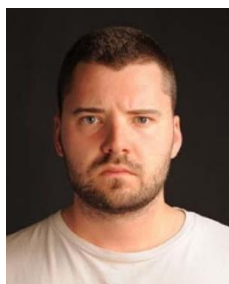
- [5] Huang X., Li Q., Liu Z., Lee F. C. „Analytical Loss Model of High Voltage GaN HEMT in Cascode Configuration” *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Denver, CO, USA, 2013, pp. 3587-3594, DOI: 10.1109/ECCE.2013.6647173.
- [6] Erickson R., Maksimovic D., „Fundamentals of Power Electronics”, Springer Science & Business Media, New York, 2007.
- [7] Qin, H., Zheng, X., Zhu Z., and Gong, C., „Analytical Power Loss Model for GaN Transistors Based on Temperature and Parasitic Parameters”, *Proceedings of 7th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE)*, Los Angeles, CA, USA, 2024, pp. 119-124, DOI: 10.1109/CEEGE62093.2024.10744178.
- [8] AutomerisRohatgi, A. (2025). WebPlotDigitizer. [Softverski paket]. <https://automeris.io>.
- [9] The MathWorks, Inc. (2024). MATLAB (R2024a) [Softverski paket]. <https://www.mathworks.com>.
- [10] Infineon Technologies, „IGC033S101 Datasheet”, Rev. 1.0, 2025. [Poluprovodnička komponenta]. Dostupno na: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-igc033s101-datasheet-en.pdf>
- [11] Infineon Technologies, „2EDB8259F Datasheet”, Rev. 1.0, 2024. [Poluprovodnička komponenta]. Dostupno na: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-2edb8259y-datasheet-en.pdf>

BIOGRAFIJE



Miroslav Popović je rođen 2001. godine u Beogradu, u Srbiji. Diplomске i master studije završio je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2024. i 2025. godine, redom. Trenutno je na doktorskim studijama na istom fakultetu. Sa timom H-Bridges 2023. godine osvojio je drugo mesto na međunarodnom takmičenju IFEC (*International Future Energy Challenge*) u Hanoveru, u Nemačkoj. Oblasti njegovog istraživanja obuhvataju poluprovodnike velikog energetskeg procepa i dizajn pretvarača snage.

ORCID: 0009-0009-5388-8932



Aleksandar R. Milić je rođen u Smederevu, u Jugoslaviji, 1993. godine. Diplomu osnovnih i master akademskih studija iz elektrotehnike stekao je na Univerzitetu u Beogradu 2016. i 2017. godine, redom. Trenutno je zaposlen na Katedri za energetske pretvarače i pogone na Elektro-

tehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Njegova istraživačka interesovanja obuhvataju digitalno upravljanje električnim pogonima i mrežnim pretvaračima. Od 2017. do 2025. godine, kao mentor studentskog tima H-Bridges, dobio je šest nagrada na takmičenju IEEE-a *International Future Energy Challenge*.

ORCID: 0000-0003-2675-4292



Nikola Mirković je rođen u Beogradu, u Srbiji, 1997. godine. Diplomu osnovnih i master akademskih studija iz elektrotehnike stekao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu 2020. i 2021. godine, redom. Doktorat iz oblasti industrijske elektronike na *Centro de Electrónica Industrial, Universidad Politécnica de Madrid*, Madrid, Španija, odbranio je u aprilu 2025. godine. Od 2021. godine član je *Centro de Electrónica Industrial, Universidad Politécnica de Madrid* (UPM). Oblasti njegovog istraživanja obuhvataju induktivni prenos energije i pretvarače snage.

ORCID: 0000-0003-0018-4682

Miroslav Popovic¹, Aleksandar Milic¹, Nikola Mirkovic²

Loss Modeling of GaN Transistors Using Datasheet Data

¹ University of Belgrade – School of Electrical Engineering, Belgrade, Serbia*² University of Belgrade – Institute Nikola Tesla, Belgrade, Serbia

Original scientific research article

Highlights

- Development of a loss-estimation algorithm for GaN power transistors
- Comparison of hard, soft, and semi-soft switching processes, with separation of channel current and parasitic capacitance contributions
- Validation of the model through a 1 kW synchronous buck converter prototype

Abstract

Transistors based on modern wide-bandgap semiconductors, such as Gallium Nitride (GaN), are increasingly used in power electronics devices. Due to their specific structure and ability to rapidly switch states, standard calculations used for determining losses in silicon transistors are not applicable in this case. Therefore, an analytical model has been developed to estimate losses in GaN transistors in a half-bridge configuration, relying on data from technical documentation. The model considers different types of switching, including hard, soft, and semi-soft switching. A comparison of losses during soft and hard switching of transistors in a synchronous buck converter under the same operating conditions has been conducted. Finally, the proposed model has been verified through the design of a 1 kW buck converter.

Keywords

GaN transistors, loss model, synchronous buck converter

Received: December 16th, 2025Reviewed: July 3rd, 2026Modified: July 8th, 2026Accepted: July 22nd, 2026

* Corresponding author: Miroslav Popovic

E - mail: miroslav@etf.bg.ac.rs

Note:

This article represents an expanded, improved and additionally peer-reviewed version of the student paper “Analytical Loss Model of GaN Transistors Based on Datasheet Data” (<https://doi.ub.bg.ac.rs/doi/cigre37-b4-05/>), awarded in the Expert Committee EC-B4 HVDC and Power Electronics, at the 37th CIGRE Serbia Conference, Zlatibor, 26-30 May 2025.