

Мирослав Поповић¹, Александар Милић¹, Никола Мирковић²



Моделовање губитака GaN прекидача

на основу каталошких података

¹ Универзитет у Београду – Електротехнички факултет, Београд, Србија*

² Универзитет у Београду – Електротехнички институт „Никола Тесла” АД, Београд, Србија

<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.4>

Оригинални научно-истраживачки рад

Кључне поруке

- Извођење алгоритма за оцену губитака GaN прекидача снаге
- Поређење тврдих, меких и полумеких прекидачких процеса и издвајање струјног доприноса канала и паразитних капацитивности
- Верификација модела кроз прототип синхроног спуштача напона снаге 1 kW

Кратак садржај

Прекидачи засновани на савременим полупроводницима великог енергетског процена, као што је галијум-нитрид (GaN), све чешће се користе у уређајима енергетске електронике. Због специфичне структуре и способности да брзо мењају радно стање, стандардни прорачуни који се користе за одређивање губитака у силицијумским прекидачима нису применљиви у овом случају. Стога је развијен аналитички модел за процену губитака код GaN прекидача у конфигурацији полумоста, који се ослања на податке из техничке документације. Модел узима у обзир различите типове комутација, као што су тврдо, меко и полумеко комутавање. Извршено је поређење губитака при меком и тврдом комутавању прекидача у склопу синхроног спуштача напона. На основу предложеног модела одређена су времена трајања комутација, која су искоришћена како би се верификовао предложени модел на претварању спуштачу напона снаге 1 kW.

Кључне речи

GaN прекидачи снаге, модел губитака, синхрони спуштач напона

Напомена:

Овај чланак представља проширену, унапређену и додатно рецензирану верзију студентског рада „Аналитички модел губитака GaN транзистора на основу података из техничке документације” (<https://doi.org/10.18485/epij.2026.4.2.4>), награђеног у Студијском комитету СТК-Б4 HVDC и енергетска електроника, на 37. Саветовању CIGRE Србија, Златибор, 26-30. маја 2025.

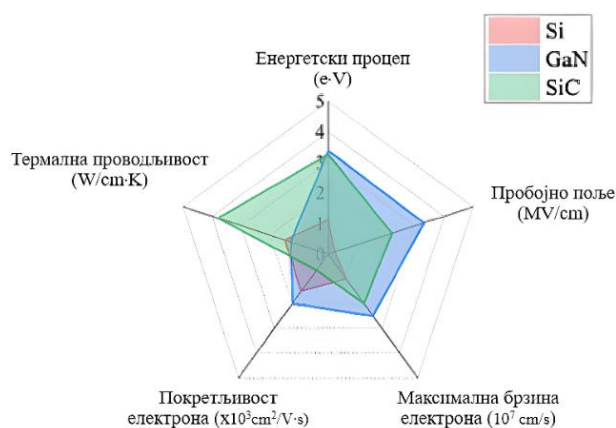
Примљено: 16. децембар 2025. Рецензирано: 3. јул 2026.
Измењено: 8. јул 2026. Одобрено: 22. јул 2026.

* Кореспондирајући аутор: Мирослав Поповић

Имејл: miroslav@etf.bg.ac.rs

1. УВОД

Вишедеценијски напредак у развоју уређаја енергетске електронике довео је до скоро потпуног искоришћења потенцијала прекидача снаге заснованих на силицијумској (Si) технологији. Због тога је даљи развој претварача који се ослањају на ову врсту полупроводника постао знатно сложенији. Међутим, појава прекидача који користе полупроводнике са високим енергетским процепом, као што су галијум-нитрид (GaN) и силицијум-карбид (SiC), омогућила је дизајн нових топологија, као и постизање веће ефикасности и мањих димензија претварача, [1]. Као што је приказано на Сlici 1, GaN полупроводници у поређењу са Si и SiC, одликују се већом електронском покретљивошћу, већом максималном брзином електрона и већим прободним пољем, [1].



Слика 1. Упоредна анализа полупроводничких технологија, [1]

С обзиром на то да GaN материјал има знатно већи енергетски процеп и прободно поље у односу на силицијумске полупроводнике, омогућен је дизајн краћег проводног канала унутар прекидача за исту вредност прободног напона. Краћи проводни канал, заједно са већом густином паковања GaN прекидача, доводи до мањег отпора проводног канала и смањених паразитних капацитивности. Наведене особине пружају мању снагу губитака током процеса укључења и искључења прекидача, што омогућава постизање значајно већих прекидачких учестаности, [2].

Да би се искористио пун потенцијал GaN прекидача, потребно је направити поуздан физички модел који описује процес прекидања, ради одређивања укупних губитака снаге и максималне учестаности прекидања. До сада развијени модели прекидања за Si прекидаче нису применљиви на GaN уређаје, будући да је хемијска и физичка структура ових прекидача другачија, [2], [3]. Процес прекидања код GaN прекидача и Si прекидача, иако на први поглед сличан, знатно се разликује. Галијум-нитридна технологија омогућава већу брзину прекидања, при чему утицај нелинеарних паразитних капацитивности постаје значајан и не може се занемарити. Уз то, принципи провођења и успостављање проводног канала разликују се у поређењу са силицијумским прекидачима. У [4] приказан је део по део линеарног

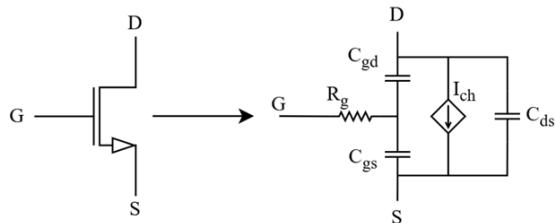
модела губитака. Овакав приступ омогућава брзу и једноставну оцену губитака, али не уважава нелинеарну зависност паразитних капацитивности од кореспондирајућих напона, услед чега долази до значајних грешака у процени при учестаностима прекидања у области од неколико стотина килохерца. Детаљнији модел губитака представљен је у [5] и уважава нелинеарну зависност паразитних капацитивности, али занемарује нелинеарну зависност транскондуктансе GaN прекидача снаге. Имајући у виду наведена ограничења, у овом раду развијен је аналитички модел прекидања GaN прекидача који истовремено уважава нелинеарне зависности паразитних капацитивности и транскондуктансе, те омогућава прецизно одређивање укупних губитака снаге на прекидачу у поређењу са тренутно доступним решењима у литератури. Развијени модел се заснива на неапроксимираним подацима из техничке документације произвођача и узима у обзир физичку структуру прекидача.

У Поглављу 2 описан је модел GaN прекидача и физичке зависности између моделованих елемената. Приликом моделовања, ради прецизнијег одређивања губитака, укупна струја прекидача подељена је на два доприноса – струју проводног канала и струју паразитних капацитивности. Наиме, током комутације не протиче целокупна струја искључиво кроз проводни канал прекидача снаге. Значајан део струје, посебно у фазама прелаза, одваја се на пуњење и пражњење паразитних капацитивности уређаја, што директно утиче на динамичко понашање прекидача и утиче на укупне комутационе губитке. Због тога је ова подела, поред уважавања нелинеарних капацитивности и транскондуктансе GaN прекидача снаге, кључна за реалистично моделовање и тачну оцену енергетских губитака током рада прекидача, [2]. Такође, укључење и искључење прекидача подељено је у сегменте и детаљно је описано за прекидаче у конфигурацији полумоста. За одабрани прекидач у Поглављу 3 приказано је издвајање релевантних података из техничке документације и приказан је алгоритам за оцену губитака. На самом крају, експериментални резултати, који потврђују поузданост модела, дати су у Поглављу 4.

2. МОДЕЛ ПРЕКИДАЧА И КОМУТАЦИОНОГ ПРОЦЕСА

Прекидачи снаге засновани на GaN технологији, иако по својој структури подсећају на Si MOSFET (енгл. *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) уређаје, поседују одређене специфичности које значајно утичу на њихово понашање приликом прекидања. У овом поглављу детаљно је описан електрични модел GaN прекидача са акцентом на кључне разлике у односу на класичне силицијумске MOSFET прекидаче. За потребе аналитичког моделовања и прорачуна губитака снаге на прекидачима дати су и детаљно описани теоријски и аналитички процеси прекидања за случај укључења и искључења прекидача у полумосној конфигурацији. Као резултат добија се систем диференцијалних

једначина путем којег се могу одредити временски облици струје канала $I_{ch}(t)$ и напона канала $v_{ds}(t)$ потребни за прорачун губитака током процеса укључења и искључења прекидача. Модел GaN прекидача приказан је на Слици 2 и у великој мери одговара моделу Si MOSFET прекидача.



Слика 2. Модел GaN прекидача

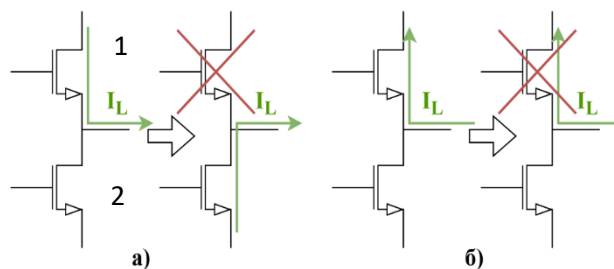
Главна разлика огледа се у одсуству уграђене диоде за провођење струје у супротном смеру. Због своје симетричне структуре, приликом провођења струје у супротном смеру дрејн (*drain*) и сорс (*source*) електроде мењају своју улогу. Потенцијал дрејн електроде је сада нижи од гејт (*gate*) потенцијала, тако да сада напон v_{gd} диктира проводност канала и омогућава прекидачу да проводи струју. У даљем тексту овај механизам провођења биће назван инверзно провођење GaN прекидача.

2.1 Прекидачки процес прекидача снаге у полумосној конфигурацији

Два прекидача у полумосној конфигурацији представљају универзалну прекидачку ћелију у савременим енергетским претварачима снаге, [1]. Иако ова конфигурација није присутна у дословно свакој топологији, већина практичних архитектура претварача снаге може се разложити на ћелије у полумосној конфигурацији или на неке њихове проширене варијанте, [6]. У овом потпоглављу биће изведен и детаљно објашњен процес прекидања два GaN прекидача у полумосној конфигурацији. На основу изведеног модела, у Поглављу 3 биће пројектован алгоритам за оцену губитака на прекидачима.

Прекидање прекидача у полумосној конфигурацији представља процес пребацивања струје са једног прекидача на други. Да би се спречио кратак спој (*shoot-through*) између горњег и доњег прекидача у полумосту, уводи се концепт мртвог времена (*dead time*). То је кратак временски размак између тренутка искључења једног прекидача и тренутка укључења другог прекидача. Мртво време осигурава да први прекидач у потпуности буде искључен пре него што се пошаље сигнал за укључење другог прекидача, чиме се ефикасно спречава појава провођења струје кроз оба прекидача. Прекидачки процес у полумосној конфигурацији условљен је радним режимом претварача, то јест смером струје кроз прекидач који се искључује. Могу се издвојити две различите врсте прекидања, при чему се основна разлика између њих

огледа у смеру струје кроз канал прекидача I_L у тренутку прекидања, као што је приказано на Слици 3.



Слика 3. Врсте прекидања за различит смер струје: а) „позитиван” смер струје; б) „инверзан” смер струје

Прва врста прекидања приказана је на Слици 3а и подразумева да је струја постојала у смеру од дрејна ка сорсу прекидача у тренутку искључења. На Слици 3а дат је пример искључења горњег прекидача у полумосту. Након искључења проводног прекидача струја прелази на супротни прекидач у полумосту. Ова врста искључења у литератури је познатија као тврдо искључење. Како се струја не може тренутно прекинути, једновременно са описаним процесом супротни прекидач означен бројем 2 на Слици 3 преузима тренутну јачину струје и то кроз његове паразитне капацитивности, будући да смер струје то омогућава. После потпуног пражњења паразитне капацитивности C_{ds} , прекидач 2 проводи струју путем инверзног механизма провођења и тај процес траје док не истекне остатак мртвог времена. Када мртво време истекне, овај прекидач може бити укључен у условима нултог напона. Ова појава назива се меко укључење, будући да је проток струје оптерећења природно испразнио паразитну капацитивност C_{ds} , [1]. Закључујемо да је прва врста прекидања одређена смером струје од дрејна ка сорсу прекидача који се искључује и карактерише је секвенца тврдо искључење – меко укључење.

Друга врста прекидања (Слика 3б), подразумева да је струја кроз полупроводнички уређај који се искључује имала смер од сорса ка дрејну, при чему струја после искључења наставља да пролази кроз исти прекидач путем инверзног провођења GaN прекидача. Овакво искључење прекидача у литератури је познато као меко искључење. Безгубитним или меким процесом се сматра само прелазак из регуларног механизма провођења у инверзни механизам провођења, али се надаље кондукциони губици повећавају услед пораста напона v_{sd} . У овом случају, капацитивност C_{ds} другог прекидача није испразњена током мртвог времена јер нема потребне количине усмереног наелектрисања које би то омогућило, као у првом случају. Укључење прекидача које следи након истека преосталог мртвог времена назива се тврдо укључење. Закључујемо да је друга врста прекидања одређена смером струје од сорса ка дрејну прекидача који се искључује и карактерише је секвенца меко искључење – тврдо укључење.

Обе врсте прекидачког процеса дате су на примеру искључења горњег – укључења доњег прекидача у полумосту, али се без губитка општости могу извести исти закључци за супротну секвенцу, пратећи смер струје кроз проводни прекидач.

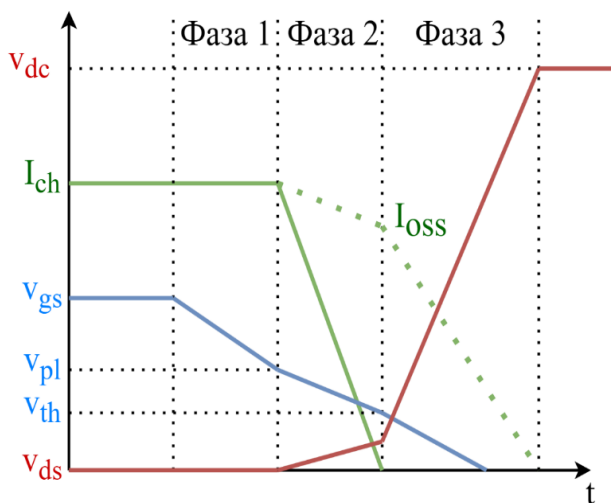
За оба случаја разматра се GaN модел приказан на Слици 2. Током прекидачког процеса, прекидач ради у омском режиму рада. У том режиму, проводни канал се може моделовати као контролисани извор струје I_{ch} , где је вршина вредност струје I_{ch} повезана са напонем v_{gs} преко транскондуктансе g_m . Приликом свих описаних прекидачких процеса претпостављено је да се излазна струја полумоста I_L не мења и да остаје константна током трајања процеса прекидања. У наредним одељцима детаљно ће бити описан процес укључења, као и искључења прекидача снаге.

2.2 Искључење прекидача

Процес искључивања GaN прекидача снаге описан је посебно за прву и другу врсту прекидања. Сваки од ових процеса искључења раздвојен је на специфичне фазе како би се омогућила прецизна анализа понашања прекидача и губитака у прелазном стању. На овај начин, могуће је разумети динамику уређаја и касније оптимизовати управљачке сигнале за постизање максималне ефикасности.

2.2.1 Прва врста прекидања – тврдо искључење

Као што је објашњено у Одељку 2.1, искључење прекидача током прве врсте прекидања подразумева да прекидну струју I_L преузима други прекидач у полумосту. Овај случај подељен је на три фазе као што је приказано на Слици 4. До овакве врсте прекидања долази када је струја I_L позитивна, то јест има смер од дрејна ка сорсу проводног прекидача.



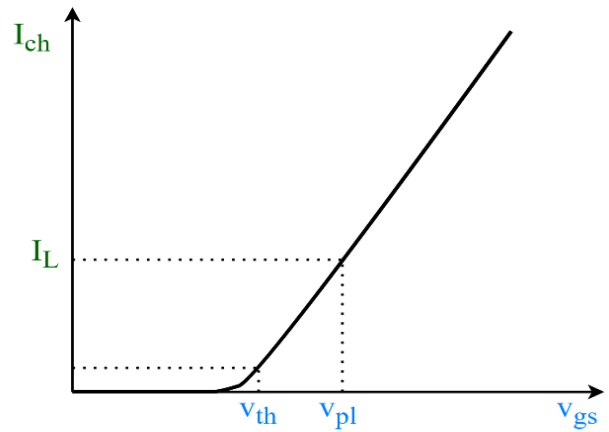
Слика 4. Прва врста прекидања – тврдо искључење

Током прве фазе упалач је добио наредбу за искључење и почиње да смањује напон v_{gs} . Напон v_{gs} мења своју вредност по следећем закону:

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

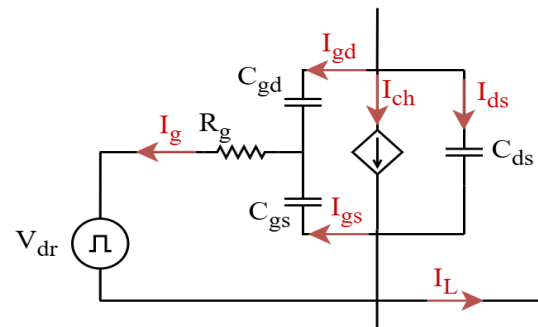
где је v_{dr_on} напон укључења прекидача који даје упалач, а R_e укупна отпорност упалачког кола и представља збир сопствене отпорности гејта транзистора, екстерног отпорника упалачког кола и излазне отпорности упалача.

Током ове фазе кроз проводни канал прекидача пролази константна струја $I_{ch} = I_L$. Прекидач се све време током прве фазе налази у засићењу, тако да струја канала не зависи од напона v_{gs} . У тренутку када се напон v_{gs} изједначи са напонем Милеровог платоа v_{pl} , где је v_{pl} напон који одговара струји I_L на преносној карактеристици прекидача приказаној на Слици 5, завршава се прва фаза. У том тренутку прекидач излази из засићеног радног режима и почиње да ради у омској области где је струја канала I_{ch} директно сразмерна напону гејта, v_{gs} .



Слика 5. Струјно-напонска карактеристика GaN прекидача

Током друге фазе напон v_{gs} наставља да опада, али је његово смањивање успорено јер упалач у овом тренутку почиње да пуни паразитну капацитивност C_{gd} , као што је приказано на Слици 6.



Слика 6. Смерови струја у моделу GaN прекидача приликом друге фазе

Диференцијална једначина која описује промену v_{gs} дата је са (2), [7]:

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

док се струја канала I_{ch} мења нелинеарно са променом v_{gs} и то по кривој приказаној на Слици 5. Битно је нагласити да све паразитне капацитивности прекидача, као што су C_{gs} , C_{gd} и C_{ds} , нису константне, већ представљају нелинеарне функције одговарајућих напона. Због тога је, за прецизну анализу у сваком тренутку, неопходно познавати тренутне вредности напона v_{gs} , v_{ds} и v_{gd} како би се тачно одредиле вредности ових капацитивности. Пошто је вредност v_{gs} позната у сваком тренутку, потребно је одредити и v_{ds} и v_{gd} . Напон $v_{ds}(t)$ може се одредити решавањем следеће диференцијалне једначине, [1]:

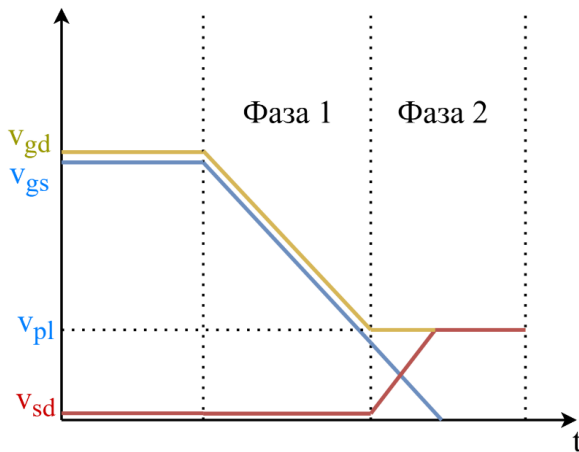
$$\frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{I_L - I_{ch}}{C_{oss1} + C_{oss2}}, \quad (3)$$

где су C_{oss1} и C_{oss2} излазне капацитивности прекидача и представљају збир C_{ds} и C_{gd} . Напон v_{gd} добија се као разлика напона v_{gs} и v_{ds} . Друга фаза траје док струја канала I_{ch} не падне на нулу, тачније док напон v_{gs} не достигне напон прага провођења v_{th} .

Током треће фазе проводни канал прекидача је затворен, али укупна струја кроз прекидач је различита од нуле и то све док се не напуне паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} . Једначине наведене за другу фазу и даље важе с тим да је сада $I_{ch} = 0$.

2.2.2 Друга врста прекидања – меко искључење

Током друге врсте прекидања (Слика 3б), активни прекидач се искључује, али целокупна струја наставља да протиче кроз њега процесом инверзног провођења GaN прекидача. Овај процес представља прелазак прекидача из засићеног режима рада у инверзни режим провођења, приказан је на Слици 7 и подељен је у две фазе.



Слика 7. Друга врста прекидања – меко искључење

До ове врсте прекидања може доћи само ако је струја I_L негативна, то јест ако има смер од сорса ка дрејну проводног прекидача (Слика 3б). Приликом ове врсте прекидања напон v_{sd} не расте до напона v_{dc} већ до напона инверзног провођења GaN прекидача. За уређаје мале снаге овај напон износи неколико волти.

Прва фаза је идентична као код првог случаја и његове прве фазе описане у Потпоглављу 2.2.1, тако да се напон v_{gs} мења по закону описаном у једначини (1). Напон v_{gd} током ове фазе једнак је збиру напона v_{gs} и v_{sd} . Пад напона на проводном каналу v_{sd} током ове фазе је константан и једнак је производу отпорности проводног канала $R_{ds,on}$ и струји канала I_{ch} .

Друга фаза почиње када напон v_{gd} достигне Милеров плато v_{pl} , то јест напон који одговара струји I_L на преносној карактеристици датој на Слици 3. После тог тренутка, напон v_{gd} остаје константан. Напон v_{gs} наставља да се мења по једначини (2). Пошто је напон v_{gd} константан а напон v_{gs} опада, пад напона на проводном каналу прекидача v_{sd} током ове фазе ће расти и може се одредити преко следеће једначине:

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

2.3 Укључење прекидача

Приликом укључења прекидача снаге поново се разликују две врсте прекидања – када струја I_L има позитиван (од дрејна ка сорсу) и када има инверзан (од сорса ка дрејну) смер (Слика 2). Сваки од наведених процеса је, слично анализи искључења, подељен на фазе. Подела на фазе омогућава прецизно разумевање динамике уређаја током преласка из искљученог у укључено стање, што ће касније бити неопходно за тачну процену прекидачких губитака и оптимизацију перформанси.

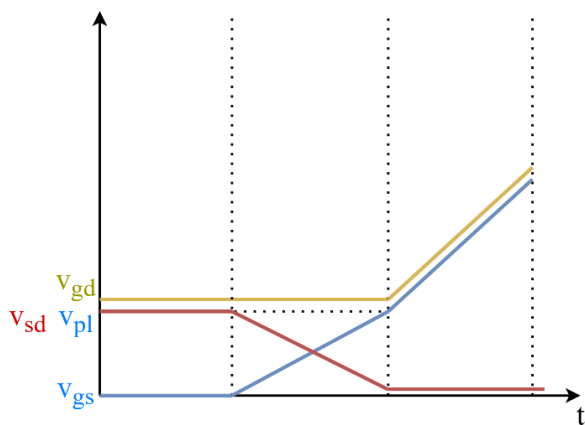
2.3.1 Прва врста прекидања – меко укључење

Током укључења прекидача приликом прве врсте прекидања (Слика 3а), подразумева се да су његове паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} испразњене (током искључења супротног прекидача) и да кроз прекидач путем инверзног провођења пролази струја јачине I_L . Овај случај подељен је у две фазе као што је приказано на Слици 8.

Током прве фазе напон v_{gd} је константан и одговара напону Милеровог платоа за струју I_L , док се напон v_{gs} повећава и то по једначини:

$$v_{gs} = v_{dr,on} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_{e}C_{gs}}} \right). \quad (5)$$

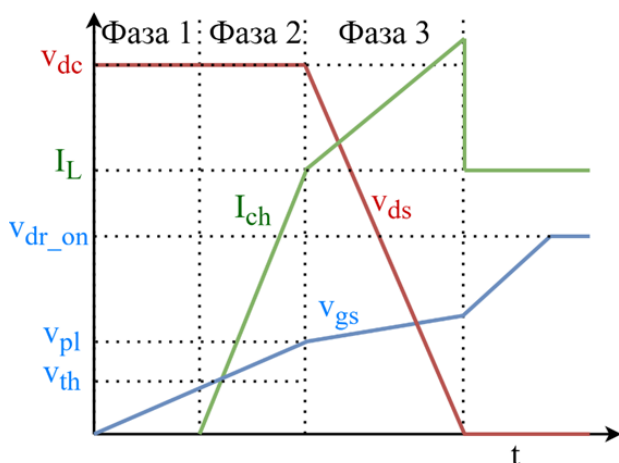
У тренутку када напон v_{gs} достигне напон Милеровог платоа за струју I_L , инверзно провођење GaN прекидача престаје и сада је активна област у потпуности проводна и дозвољава пролазак струје у оба смера. Током друге фазе напон v_{gs} наставља да расте по динамици приказаној у (5) и достиже вредност $v_{dr,on}$.



Слика 8. Прва врста прекидања – меко укључење

2.3.2 Друга vrsta prekidanja – tvrdo uključenje

Током укључења прекидача приликом друге врсте прекидања, Слика 3б, паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} нису претходно испразњене, као у претходном случају, тако да их је потребно испразнити током прекидачког процеса. Укључење се у овом случају одвија у три фазе, приказане на Слици 9.

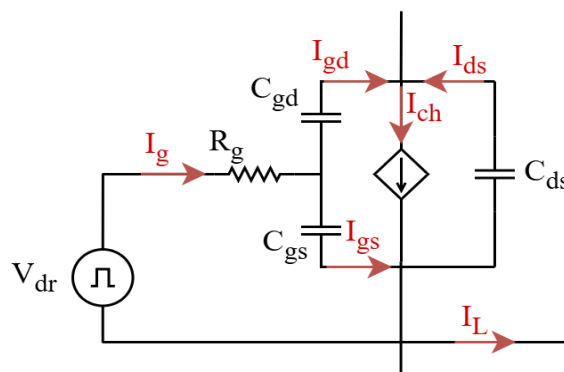


Слика 9. Друга врста прекидања – тврдо укључење

Током прве фазе напон v_{gs} расте до напона прага провођења прекидача v_{th} . И током прве и током друге фазе напон v_{gs} се мења по једначини (5). У тренутку када струја кроз активну област прекидача крене да расте почиње друга фаза.

Током друге фазе напон v_{gs} расте од напона прага провођења v_{th} до напона Милеровог платоа v_{pl} који одговара струји I_L , док струја расте од нулте вредности до I_L . Веза између напона v_{gs} и струје I_L дата је на Слици 2. Док прекидач који се укључује не преузме сву струју са прекидача који је у инверзном механизму провођења, не може да дође до пада напона v_{ds} . Разлог због чега долази до ове појаве крије се у самом инверзном механизму провођења који не дозвољава паду напона на својој активној области да се мења докле год постоји нека инверзна струја која протиче кроз канал.

Током треће фазе, паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} се празне и то струјом кроз активни канал прекидача, као што је приказано на Слици 10.



Слика 10. Смерови струја у моделу GaN прекидача приликом друге врсте прекидачког процеса – укључење

Током ове фазе долази до значајног повећања струје активне области прекидача I_{ch} , тако да је и напрезање које полупроводник трпи значајно веће од напора устаљеног радног режима. Струја кроз активну област I_{ch} и даље је повезана са напоном v_{gs} преко графика датог на Слици 10.

Брзина промене напона v_{gs} сада је знатно успорена јер струја коју даје упалач не пуни само капацитивност C_{gs} већ и празни капацитивност C_{gd} . Промена напона v_{gs} дата је, [7], помоћу:

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

док се промена напона v_{ds} одвија по једначини:

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

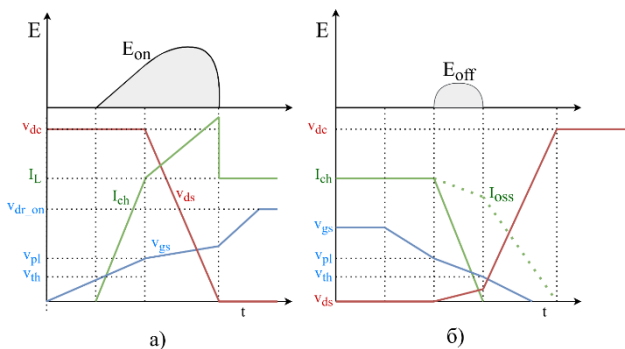
Решавањем система диференцијалних једначина (1) – (7) и узимањем у обзир да су вредности свих паразитних капацитивности функције напона на њима, добијају се временски облици струје $I_{ch}(t)$ и напона $v_{ds}(t)$. Временски облици струје $I_{ch}(t)$ и напона $v_{ds}(t)$ потребни су како би се прецизно одредили губици на прекидачима.

3. ПРОРАЧУН ГУБИТАКА

Кључни показатељи перформанси једног претварача снаге су ефикасност, величина и цена. Ефикасност се може повећати одабиром GaN полупроводничких компоненти са бољим статичким и динамичким карактеристикама од конвенционалних Si прекидача. Боље динамичке карактеристике омогућавају рад на већим фреквенцијама, што доводи до смањења потребних димензија пасивних компоненти као што су трансформатори, пригушнице и кондензатори, [4]. Да би се у потпуности искористиле предности GaN прекидача, неопходно је развити поуздан модел за прорачун губитака. На основу таквог модела могуће је одредити који GaN прекидач је најподобнији за конкретну

примену, да ли је потребно додатно хлађење, који тип хлађења је адекватан, као и максималну радну учестаност прекидања претварача. У овом поглављу биће разрађен модел за оцену губитака на основу претходно изведених релација и информација сакупљених из техничке документације прекидача.

Губици у прекидачима током једног прекидачког циклуса обухватају: губитке при укључењу, губитке при искључењу, губитке у гејт петљи, губитке током провођења струје и губитке услед механизма инверзног провођења. На Слици 11 приказани су таласни облици енергије губитака при тврдом укључењу и искључењу прекидача. Битно је уочити да је преклапање струје и напона значајно израженије приликом укључења прекидача, због чега је и енергија губитака при укључењу већа него при искључењу. У одређеним топологијама, у којима се могу реализовати два прекидачка прелаза прве врсте (Слика 3а), а које карактерише секвенца меког укључења и тврдог искључења у оквиру једне периоде прекидања, могуће је у великој мери смањити укупне прекидачке губитке. У том случају, током једне периоде добијају се два мека укључења и два тврда искључења. Оваква секвенца је карактеристична за LLC резонантне претвараче, који применом GaN прекидача могу постићи веома високе ефикасности у поређењу са другим изолованим DC/DC топологијама. Иако је овај режим рада уобичајен за LLC претвараче, могуће га је реализовати и у синхронном спуштачу напона, под условима који ће бити детаљно размотрени у Поглављу 3.2.



Слика 11. Енергија губитака приликом тврдог а) укључења б) искључења

Укупни комутациони и кондукциони губици могу се изразити као производ струје која тече кроз проводни канал прекидача и пада напона на њему:

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

Да би се оценила снага губитака на прекидачу, потребно је одредити временске таласне облике величина од значаја у функцији радних режима. Како би се

одредили временски облици струје канала $I_{ch}(t)$ и пада напона на каналу $v_{ds}(t)$, потребно је решити систем диференцијалних једначина којим је резултовало Поглавље 2. Да би систем једначина (1) – (7) био решив, потребно је познавати следеће зависности:

$I_{ch}(v_{gs})$ – зависност струје активне области прекидача од напона v_{gs} ;

$I_{ch}(v_{gd})$ – зависност струје активне области прекидача од напона v_{gd} приликом инверзног провођења струје;

$C_{ds}(v_{ds})$ – зависност капацитивности дрејн–сорс од пада напона на активној области прекидача v_{ds} ;

$C_{gd}(v_{gd})$ – зависност капацитивности гејт–дрејн од напона v_{gd} ;

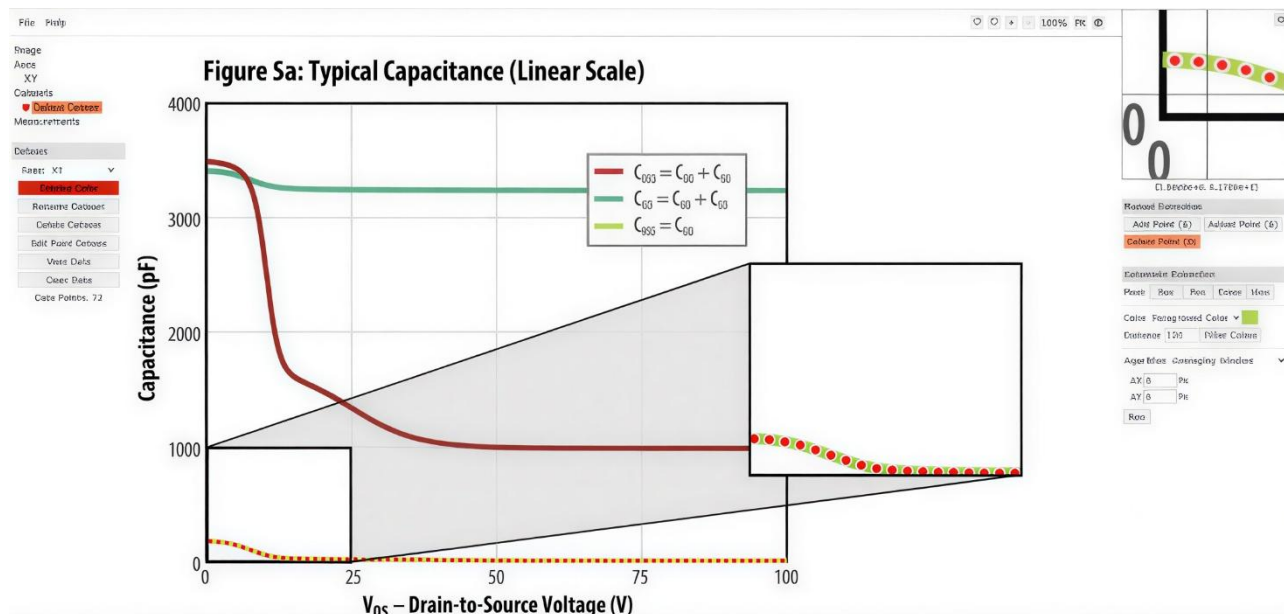
$C_{gs}(v_{gs})$ – зависност капацитивности гејт–сорс од напона v_{gs} .

Претходно наведене зависности могу се прецизно одредити експерименталним методама, као што је тест двоструког укључења (*Double-pulse test*). Међутим, овај приступ често није практичан јер подразумева набавку компоненте и спровођење свих мерења како би се проверила њена погодност за одређену примену. Алтернативни начини укључују употребу апроксимационих израза, прилагођавање кривих или, у случају паразитних капацитивности, примену модела заснованог на наелектрисањима (*charge-based model*). Иако мерења зависности представљају најпоузданији извор података, до њих се најтеже долази, док апроксимационе методе често доводе до значајних одступања.

Због тога је у овом раду примењен другачији приступ. На основу кривих датих у техничкој документацији прекидача, коришћењем софтверског пакета *Automeris* одређене су дискретне вредности тражених величина. Из ових дискретних зависности и диференцијалних једначина добијених дискретизацијом израза (1) – (7), могуће је одредити таласне облике $I_{ch}(t)$ и $v_{ds}(t)$.

3.1 Прикупљање података из техничке документације

Подаци у техничкој документацији прекидача најчешће су представљени у облику графика, који су добијени на основу мерења која је произвођач спровео и потом приказао у техничкој документацији. Уколико произвођач не располаже табеларним вредностима тражених зависности или није вољан да их подели, неопходно је извршити издвајање података директно са графика из техничке документације. У овом раду тај поступак је реализован коришћењем софтверског пакета [8]. Пример коришћења овог алата дат је на Слици 12.



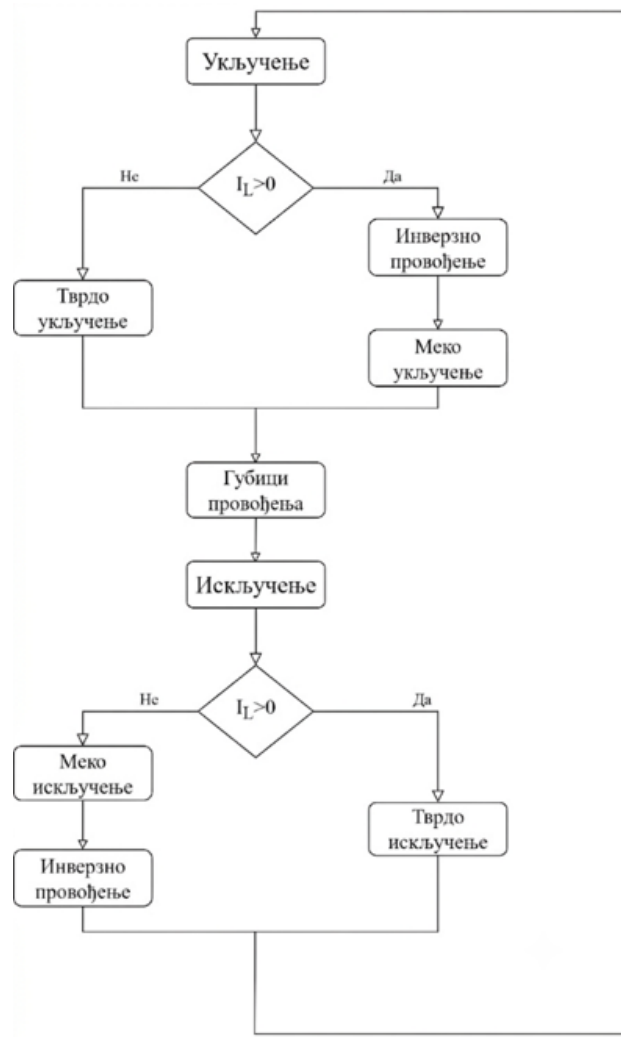
Слика 12. Коришћење алата за издвајање података из техничке документације

Овај софтверски пакет намењен је дигитализацији графичких података, односно издвајању нумеричких вредности са слика графика. Овај алат омогућава кориснику да на једноставан начин из постојећих дијаграма добије табеларне податке погодне за даљу анализу и прорачун. Слика приказује промену паразитних капацитивности извучених из техничке документације комерцијално доступног GaN прекидача у зависности од напона дрејн-сорс v_{ds} . Софтверски пакет је коришћен да би се у више од 100 тачака процениле дискретне вредности капацитивности, које су означене црвеним тачкама, чиме је обезбеђена висока тачност приказане зависности.

3.2 Алгоритам за оцену губитака

На основу диференцијалних једначина изведених у Поглављу 2 и података сакупљених из техничке документације могуће је оценити губитке дисипиране на прекидачима. Како би се одредило радно стање прекидача и врста прекидачког процеса која се реализује, у сваком тренутку је потребно познавати струју полумоста I_L . Струја I_L не зависи директно од врсте прекидача већ од спољних параметара електричног кола као што су напон једносмерног кола и вредности пасивних елемената или активног оптерећења. Познавањем струје I_L на основу алгоритма приказаног на Слици 13 могуће је одредити стања кроз која пролази прекидач током једног периода прекидања. Под позитивним смером струје сматра се струја која има смер од дрејна ка сорсу, док је негативан смер струје од сорса ка дрејну.

Резултат алгоритма јесу дискретне вредности пада напона на проводном каналу $v_{ds}(k)$ и струје проводног канала $I_{ch}(k)$, те се губици на том прекидачу током једне периоде одређују на основу дискретизоване једначине (9).



Слика 13. Стања кроз која пролази један прекидач у полумосту током једног циклуса прекидања

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

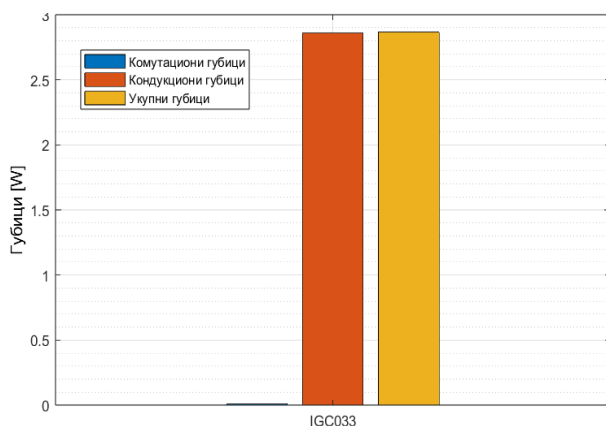
3.3 Оцена губитака

У овом поглављу извршена је анализа и процена прекидачких губитака за изабрани GaN прекидач у полумосној конфигурацији. Губици су одређени и међусобно упоређени за две различите вредности таласности струје, са циљем да се сагледа утицај различитих секвенци прекидачких стања на укупну дисипацију снаге. У ту сврху развијена су скрипта у програмском пакету [9], која су омогућила решавање система диференцијалних једначина добијених дискретизацијом израза (1) – (7) коришћењем Ојлерове дискретизационе методе првог реда. Стања система су одређена применом алгорита приказаног на Слици 13, чиме је омогућено проучавање губитака прекидача у различитим радним режимима претварача.

Процена губитака извршена је при следећим условима. Снага претварача одређена је да буде $P = 1 \text{ kW}$, улазни напон је $V_{in} = 60 \text{ V}$ и фактор испуне $d = 0,75$, док су остали параметри од значаја дати у Табели I. Укупни губици на оба прекидача у полумосној конфигурацији дати су на Слици 14, за случај када је таласност струје већа од њене средње вредности.

Табела I Параметри дизајнираног спуштача напона

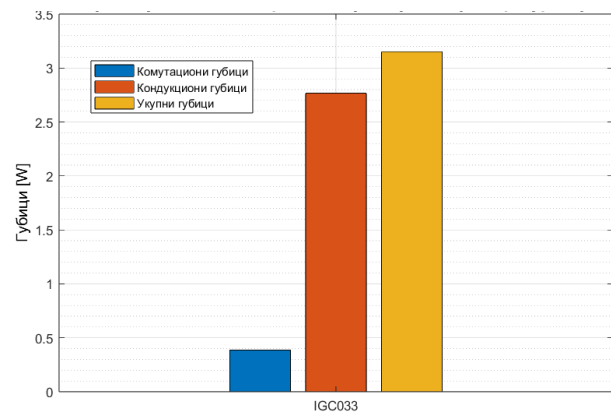
Параметар	Вредност	Јединица
Улазни напон	10–72	V
Изразни напон	5–70	V
Номинална снага	1	kW
Учестаност прекидања	125	kHz
Мртво време	25	ns
Пригушница	1,5	μH
Прекидач	GaN [10]	/
Упаљач	[11]	/



Слика 14. Укупни губици на оба прекидача у полумосној конфигурацији

Са графика се одмах примећује да су комутациони губици занемарљиво мали у односу на кондукционе губитке. У овом радном режиму излазна струја је приближно $I_L = 22 \text{ A}$, док је амплитуда таласности струје, максимална девијација у односу на средњу вредност, 27 A. Због овако велике таласности приликом гашења доњег прекидача струја је негативна и износи

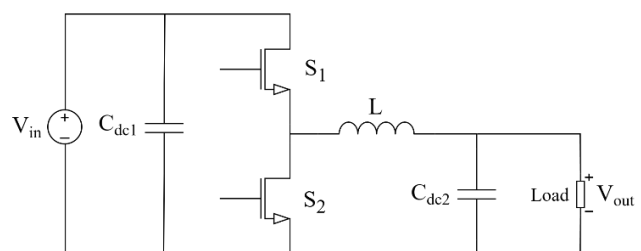
$I_{L_min} = -5 \text{ A}$. Тада се то искључење одвија по сценарију описаном у 2.2.1. Са Слике 3 може се уочити да је преклапање струје $I_{ch}(t)$ и напона $v_{ds}(t)$ врло мало, те су и губици дефинисани једначином (8) врло мали. После искључења доњег прекидача наступа период мртвог времена и укључење горњег прекидача. Укључење горњег прекидача се одвија по сценарију описаном у 2.3.1 и такође ствара минималне губитке. Битно је нагласити да када дође до комутације искључење горњег – укључење доњег, она се одвија поново по сценарију 2.2.1, па 2.3.1 и резултује минималним комутационим губицима. Комбинација комутације 2.2.1 и 2.3.1 може се остварити два пута током једне периоде само уколико је струја приликом укључења горњег прекидача негативна, то јест ако је таласност струје већа од струје потрошача I_L . Укупни губици на оба прекидача у случају када је таласност струје мања од струје потрошача I_L приказани су на Слици 15. Губици у овом случају су за 10% сада већи.



Слика 15. Укупни губици на оба прекидача у полумосној конфигурацији при тврдом комутавању

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

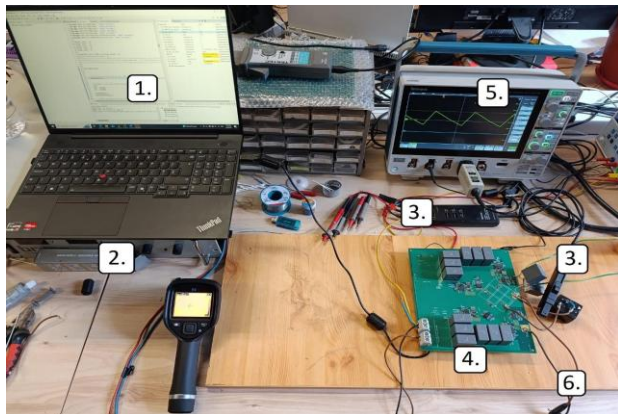
Како би се испитао и верификовао начињени аналитички модел, испројектован је претварач спуштач напона снаге 1 kW (Слика 16). Приликом пројектовања и израде прототипа, распореду компонената на штампаној плочи посвећена је посебна пажња како би се минимизирали паразитни елементи упаљачког кола и њихов утицај на прекидачки процес. Кључни подаци који описују прототип претварача дати су у Табели I. Валидација описаног модела комутација експериментално је вршена на поставци датој на Слици 17.



Слика 16. Топологија пројектованог спуштача снаге

Поставку чине:

- (1) лаптоп за комуникацију са претварачем у реалном времену;
- (2) енергетско напајање;
- (3) напонске и струјне сонде пропусног опсега до 150 MHz;
- (4) развијени прототип претварача;
- (5) осцилоскоп;
- (6) пасивни потрошач отпорности $R_L = 2 \Omega$.



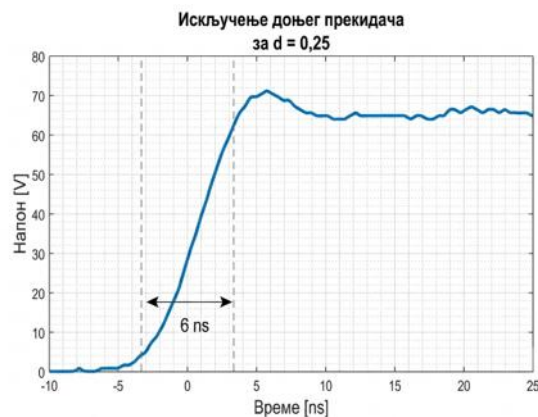
Слика 17. Експериментална поставка у Лабораторији за дигитално управљање претварачима и погонима Електротехничког факултета Универзитета у Београду

Постоји више начина за верификацију комутационог модела и алгоритма за оцену губитака. Један од приступа је мерење укупних губитака на нивоу целог претварача, након чега се врши њихова расподела на губитке у бакарним проводницима, реактивним елементима и помоћној електроници. Одузимањем ових компонената од укупне дисипације могуће је индиректно проценити губитке на прекидачима. Међутим, у дизајнираном претварачу прекидачки губици чине релативно мали удео у укупним губицима, што овај метод чини подложним значајним грешкама и одступањима.

Због тога је примењен други приступ – директна процена тачности комутационог модела кроз упоређивање таласних облика напона $v_{ds}(t)$ и струје $I_{ch}(t)$. Како су ове две величине уско повезане, добро поклапање таласних облика напона подразумева и добро поклапање струје, те самим тим и адекватну процену прекидачких губитака.

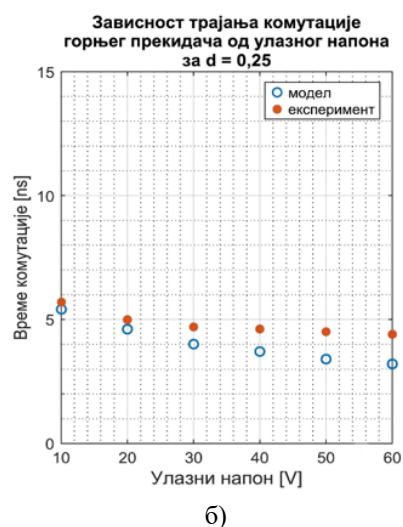
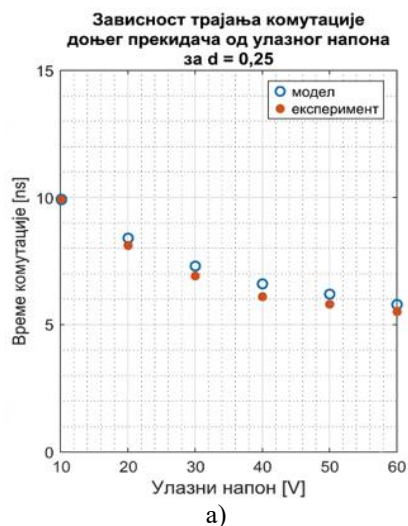
Извршен је низ експеримената у којима је улазни напон мењан у опсегу од $V_{in} \in [10, 60] V$ са кораком 10 V, док је истовремено фактор испуне узимао вредности од $d \in [0,25; 0,5; 0,75]$. Отпорност пасивног потрошача фиксирана је током свих експеримената и износи 2Ω .

Кључни параметар за верификацију развијеног модела је време трајања комутације. Трајање комутације испитивано је на поставци приказаној на Сlici 16 при различитим радним режимима и даље поређено са резултатима аналитичко-нумеричког модела. Уз помоћ осцилоскопа, измерено је време потребно напону $v_{ds}(t)$ да се промени са 0 V на V_{dc} , приликом искључења доњег прекидача (Слика 18).



Слика 18. Промена напона v_{ds} приликом искључења доњег прекидача

Измерена су времена трајања комутације за доњи и горњи прекидач за шест различитих улазних напона. Експериментални резултати су упоређени са временима трајања комутације добијених из модела у целом радном опсегу напона претварача. Добијени резултати представљени су на Сlici 19.



Слика 19. Зависност дужине трајања комутације од улазног напона: а) доњег прекидача; б) горњег прекидача у полумосту

Са Сликe 19 може се закључити да развијени модел прилично добро прати експерименталне вредности, нарочито у случају доњег прекидача. На напону од 10 V модел показује готово идеално поклапање са мерењима, са тачношћу од 99%. Међутим, како се улазни напон повећава, уочава се одређено одступање модела, при чему је највећа разлика уочена на 40 V, где тачност опада на 92%.

С друге стране, резултати за горњи прекидач показују нешто слабије поклапање са експериментом. Тачност модела опада са порастом улазног напона, достижући 75% на 60 V. Ово може указивати на додатне нелинеарне ефекте или асиметрију у утицају паразитних елемената који нису у потпуности обухваћени тренутним моделом. Упркос одступањима, модел показује задовољавајућу тачност, што га чини корисним алатом за процену времена комутације и оцену губитака на прекидачима.

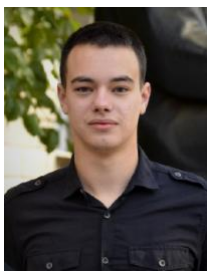
5. ЗАКЉУЧАК

У раду су детаљно описани процеси комутација GaN прекидача у полумосној конфигурацији. Изведен је физички модел комутација чији су излазни параметри временски облик струје канала $I_{ch}(t)$ и временски облик пада напона на каналу $v_{ds}(t)$. Параметри од интереса описани су у функцији радних режима. Како би изведене једначине биле решиве без икаквог увођења апроксимација, уз помоћ одговарајућег софтверског пакета, извучени су релевантни подаци из техничке документације конкретног прекидача. Тако извучени подаци искоришћени су приликом дискретног решавања једначина претходно описаног физичког модела. За потребе верификације формираног аналитичко-нумеричког модела, развијен је и испитан прототип претварача спуштача напона заснован на GaN технологији. Испитивања су спроведена у целом опсегу радног напона и поређена су трајања времена комутације којима резултују модел и експериментална поставка. Модел показује веома добро поклапање од преко 92% са експерименталним испитивањима трајања комутације GaN прекидача. Највећа одступања између резултата добијених аналитичко-нумеричким моделом и експериментално измерених времена комутације на прототипу достижу до 25% за горњи прекидач, што указује на присуство одређених ефеката који нису у потпуности обухваћени моделом и оставља простор за даља истраживања.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lidow A., De Rooij M., Glaser J., „GaN Power Devices for Efficient Power Conversion”, четврто издање књиге, 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 [цитирано 5. 1. 2026]. Доступно на: <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) [Софтверски пакет]. <https://www.mathworks.com>.
- [10] Infineon Technologies, „IGC033S101 Datasheet”, Rev. 1.0, 2025. [Полупроводничка компонента]. Доступно на: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-igc033s101-datasheet-en.pdf>
- [11] Infineon Technologies, „2EDB8259F Datasheet”, Rev. 1.0, 2024. [Полупроводничка компонента]. Доступно на: <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-2edb8259f-datasheet-en.pdf>

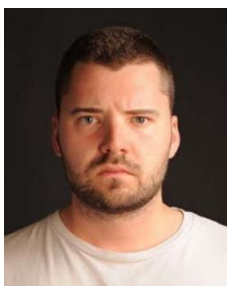
БИОГРАФИЈЕ



Мирослав Поповић је рођен 2001. године у Београду, у Србији. Дипломске и мастер студије завршио је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2024. и 2025. године, редом. Тренутно је на докторским студијама на истом факултету. Са тимом H-Bridges 2023. године

освојио је друго место на међународном такмичењу IFEC (*International Future Energy Challenge*) у Хановеру, у Немачкој. Области његовог истраживања обухватају полупроводнике великог енергетског процепа и дизајн претварача снаге.

ORCID: 0009-0009-5388-8932



Александар Р. Милић је рођен у Смедереву, у Југославији, 1993. године. Диплому основних и мастер академских студија из електротехнике стекао је на Универзитету у Београду 2016. и 2017. године, редом. Тренутно је запослен на Катедри за енергетске претварааче и погоне на Електротехничком факултету

Универзитета у Београду. Његова истраживачка интересовања обухватају дигитално управљање електричним погонима и мрежним претвараачима. Од 2017. до 2025. године, као ментор студентског тима H-Bridges, добио је шест награда на такмичењу IEEE-a *International Future Energy Challenge*.

ORCID: 0000-0003-2675-4292



Никола Мирковић је рођен у Београду, у Србији, 1997. године. Диплому основних и мастер академских студија из електротехнике стекао је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 2020. и 2021. године, редом. Докторат из области индустријске електронике на *Centro de Electrónica Industrial, Universidad Politécnica de Madrid*, Мадрид, Шпанија, одбранио је у априлу 2025. године. Од 2021. године члан је *Centro de Electrónica Industrial, Universidad Politécnica de Madrid* (UPM). Области његовог истраживања обухватају индуктивни пренос енергије и претварааче снаге.

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

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.

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

* Corresponding author: Miroslav Popovic

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