

DOI: [10.46793/CIGRE37.B4.05](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B4.05)**B4.05****АНАЛИТИЧКИ МОДЕЛ ГУБИТАКА GAN ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВУ ПОДАТАКА
ИЗ ТЕХНИЧКЕ ДОКУМЕНТАЦИЈЕ****ANALYTICAL LOSS MODEL OF GAN TRANSISTORS BASED ON DATASHEET DATA****Miroslav Popović, Nikola Mirković, Aleksandar Milić^{1*}**

Кратак садржај: Транзистори засновани на савременим полупроводницима великог енергетског процепа, као што је галијум нитрид (GaN), све чешће користе се 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 полу-меко комутовање. Извршено је поређење губитака при меком и тврдом комутовању прекидача у склопу синхроног спуштача напона. На основу предложеног модела, одређене су оптималне вредности мртвог времена како би се минимизовало провођење прекидача током овог периода. На крају, предложени модел верификован на претварачу спуштачу напона снаге 1 kW.

Кључне речи: *GaN транзистори, синхрони спуштач напона, модел губитака*

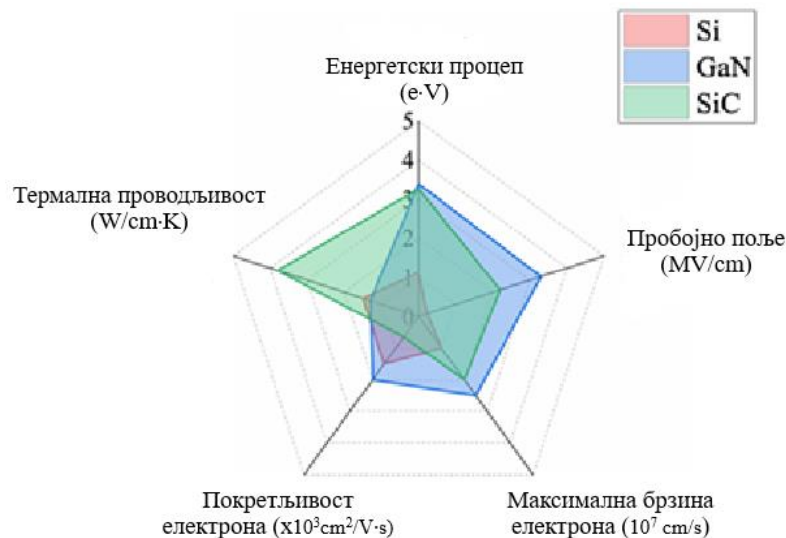
Abstract: Transistors based on modern wide-bandgap semiconductors, such as Gallium Nitride (GaN), are increasingly used in power electronics devices. Due to their specific structure and ability to rapidly switch states, standard calculations used for determining losses in silicon transistors are not 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. Based on the proposed model, optimal dead-time values have been determined to minimize transistor conduction during this period. Finally, the proposed model has been verified through the design of a 1 kW buck converter.

Key words: *GaN transistors, synchronous buck converter, loss model*

^{1*} Miroslav Popović, Elektrotehnički fakultet univerziteta u Beogradu, miroslav.popovic01@gmail.com
Nikola Mirković, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, nikola.mirkovic@ieent.org
Aleksandar Milić, Elektrotehnički fakultet, Univerziteta u Beogradu, milic.aleksandar@etf.rs

1 УВОД

Вишедеценијски развој уређаја енергетске електронике омогућио је максимално искоришћење потенцијала транзистора заснованих на силицијумској (Si) технологији. Због тога је даље развој оваквих претварача постало све захтевније. Међутим, појава прекидача који користе полупроводнике са високим енергетским процепом, као што су галијум-нитрид (GaN) и силицијум-карбид (SiC), омогућила је дизајн претварача веће ефикасности и мањих димензија. Како је приказано на Слици 1, GaN полупроводници у поређењу са Si и SiC, одликују се већом електронском покретљивошћу, већом максималном брзином електрона и могућношћу издржавања јачих електричних поља



Слика 1. Упоредна анализа полупроводничких технологија [1]

Тежња ка повећању учестаности прекидања у уређајима енергетске електронике проистиче из чињенице да се реактивни елементи претварача смањују са њеним повећањем те се тиме остварује мања укупна запремина и већа густина снаге. Комутациони процес код GaN прекидача траје краће у односу на Si и SiC прекидаче, што резултује мањом дисипацијом енергије приликом комутације. Комутациони губици прекидача једнаки су производу дисипиране енергије и учестаности прекидања f_{PWM} и линеарно расту са њеним увећањем. Из тог разлога, смањена дисипација енергије током комутације омогућава рад на вишим учестаностима прекидања f_{PWM} без додатног повећавања губитака.

Да би се искористио пун потенцијал GaN прекидача, потребно је направити поуздан физички модел који описује процес комутација, ради одређивања укупних губитака и максималне учестаности прекидања. Мотивација за егзактно описаним моделом комутација такође проистиче и из чињенице да за разлику од Si и SiC прекидача, прекидачи засновани на GaN технологији немају интринзичну диоду, али упркос томе могу да проводе негативну струју. Главни недостатак овог режима рада јесу повећани кондукциони губици. Како би се ови губици минимизирали потребно је минимизирати време провођења, односно у случају полумосне конфигурације – оптимизовати мртво време. Више о овом режиму рада биће речено у Поглављу 2.

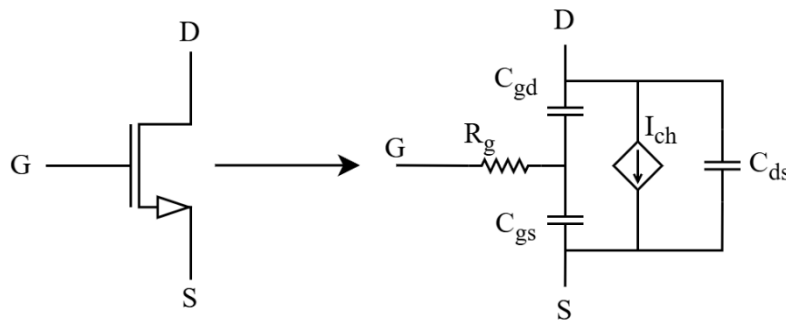
До сада развијени модели комутација за Si прекидаче нису применљиви на GaN уређаје, јер GaN технологија омогућава знатно већу брзину комутације, при чему утицај нелинеарних паразитних капацитивности постају значајани и не могу се занемарити. У радовима [2]–[3] аналитички модели су проширени паразитним капацитивностима како би се одредили карактеристични таласни облици струје и напона прекидача током комутације. Представљени модели су често врло сложени и захтевају податке о прекидачу који нису доступни у техничкој документацији.

Узимајући у обзир претходно наведене разлоге, у овом раду развијен је детаљан аналитички модел комутације GaN прекидача, заснован на неапроксимираним подацима из техничке документације, који омогућава прецизно одређивање укупних губитака прекидача и оптималног мртвог времена. У поглављу 2. описан је модел GaN прекидача и физичке зависности између моделираних 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 транзистора. 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 кључна за реалистично моделовање и тачну процену енергетских губитака током рада прекидача [2]. Такође, укључење и искључење прекидача подељено је у сегменте и детаљно је описано за прекидаче у конфигурацији полумоста. У Поглављу 3. за одабрани прекидач приказана је екстракција релевантних података из техничке документације и процењени су губици на прекидачима. На 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 уређаје, поседују одређене специфичности које значајно утичу на њихово понашање приликом комутација. У овом поглављу детаљно је описан електрични модел GaN прекидача са акцентом на кључне разлике у односу на класичне силицијумске MOSFET-е. За потребе аналитичког моделовања и прорачуна губитака снага на прекидачима, у оквиру поглавља су и детаљно теоријски и аналитички описани процеси комутације. 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.

Модел GaN прекидача приказан је на Слици 2. и у великој мери одговара моделу Si MOSFET-а. Главна разлика се огледа у одсуству уграђене диоде за провођење струје у супротном смеру. Због своје симетричне структуре, приликом провођења струје у супротном смеру дрејн (енг. *drain*) и сорс (енг. *source*) електроде мењају своју улогу. Потенцијал дрејн електроде је сада нижи од гејт (енг. *gate*) потенцијала, тако да сада напон v_{gd} диктира проводност канала и омогућава прекидачу да проводи струју. У случају када је прекидач искључен $v_{gs} = 0$, напон v_{dg} је једнак напону на проводном каналу v_{ds} . У даљем тексту овај механизам провођења биће назван инверзно провођење GaN прекидача.

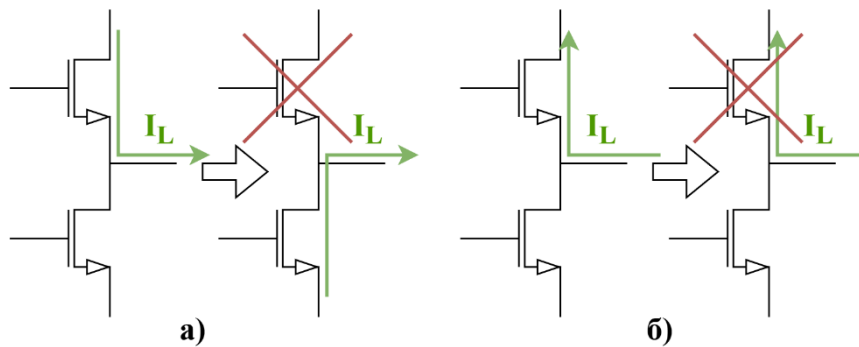


Слика 2. Модел GaN прекидача

R_g у приказаном моделу представља сопствену отпорност гејт терминала прекидача. C_{gs} , C_{gd} и C_{ds} моделују паразитне капацитивности између одговарајућих терминала, док I_{ch} представља напонски контролисан струјни извор.

2.1 Комутације прекидача у полумосној конфигурацији

Комутациони процес у полумосној конфигурацији условљен је радним режимом претварача. Могу се издвојити три различите врсте комутација, при чему се основна разлика између њих огледа у смеру струје I_L у тренутку комутације Слика 3.



Слика 3 Врсте комутација

Прва врста комутација Слика 3.а) подразумева да се проводни прекидач искључује, а струја прелази на супротни прекидач у полумосту. Кроз супротни прекидач струја пролази путем инверзног механизма провођења GaN прекидача. После пражњења паразитне капацитивност C_{ds} , супротни прекидач може бити укључен у условима нултог напона што се тада назива меким комутовањем [1].

Други врста комутација Слика 3.б) подразумева да се полупроводнички уређај искључи, при чему струја наставља да пролази кроз њега путем инверзног провођења GaN прекидача (што се сматра безгубитним процесом). Безгубитни процесом се сматра само прелазак из регуларног механизма провођења у инверзни механизам провођења, али се на даље кондукциони губици повећавају услед пораста напона v_{sd} . У овом случају капацитивност C_{ds} другог прекидача није испразњена, те се његово укључење назива Тврдо комутовање.

Трећи врста комутација подразумева да се проводни прекидач искључује и да струја прелази на супротни прекидач у полумосту (као у првом случају), али струја I_L није довољно велика да за мртво време t_{dt} стигне да испразни C_{ds} другог прекидача. Овакав комутациони процес у литератури назива се полумеким комутовање.

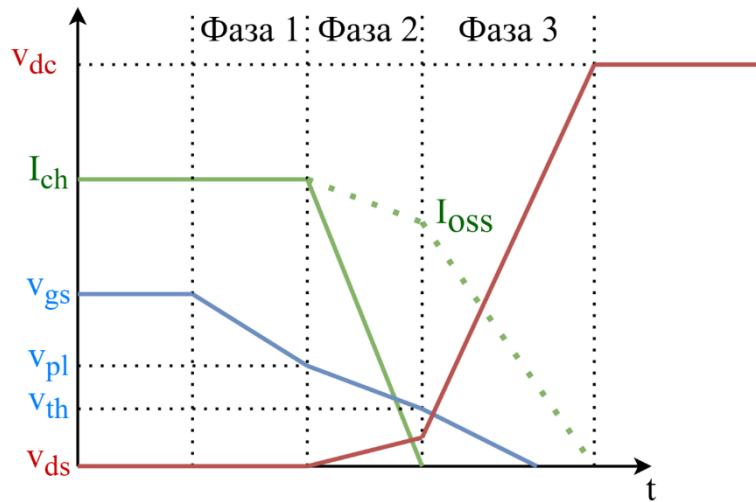
За сва три случаја разматра се GaN модел приказан на Слици 1. Током комутационог прелаза, прекидач ради у зони засићења. У том режиму, проводни канал се моделује као контролисани извор струје I_{ch} , који је преко транскондуктансе g_m повезан са напонем v_{gs} . Приликом свих описаних комутационих процеса претпостављено је да је струја потрошача I_L константна.

2.2 Искључење прекидача

Процес искључивања GaN прекидача описан је посебно за прву и другу врсту комутација, док се трећа врста не разматра посебно али је уважена прилоком имплементације. Оба случаја искључења подељена су на фазе.

2.2.1 Први врста комутације - искључење

Као што је објашњено у Потпоглављу 2.1 искључење прекидача, током прве врсте комутација, подразумева да прекидну струју I_L преузима други прекидач у полумосту. Овај сценарио подељен је на три фазе као што је приказано на Слици 4. До овакве комутације долази када је струја I_L позитивна и има смер од полумоста ка потрошачу.



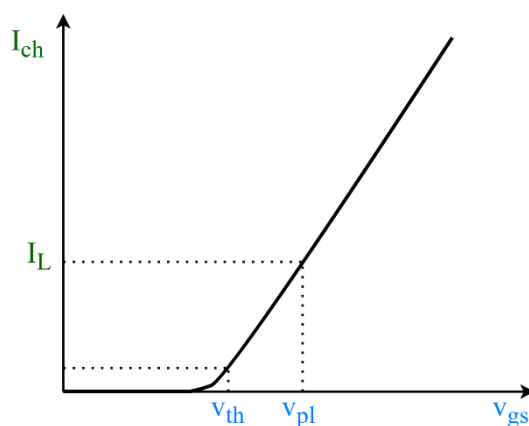
Слика 4. Прва врста комутације - искључење

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

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

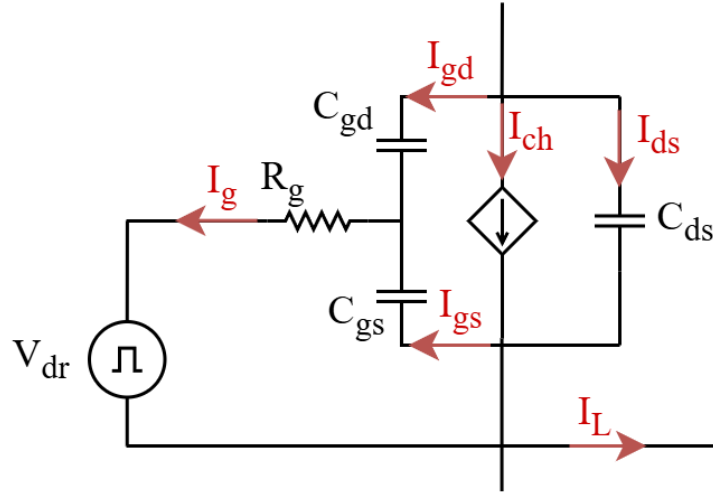
где је v_{dr_on} напон укључења прекидача који даје упаљач, а R_e укупна отпорност упаљачког кола и представља збир сопствене отпорности гејта транзистора, екстерног отпорника упаљачког кола и излазне отпорности упаљача.

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 напоном 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.



Слика 5. Струјно-напонска карактеристика GaN прекидача

Током друге фазе напон v_{gs} наставља да опада али је његово смањивање успорено јер упаљач 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:

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

док се струја канала I_{ch} мења нелинеарно са променом v_{gs} и то по кривој приказаној на Слици 5. Пошто се вредност C_{ds} нелинеарно мења са променом v_{ds} потребно је познавање $v_{ds}(t)$ које се добија из следеће диференцијалне једначине:

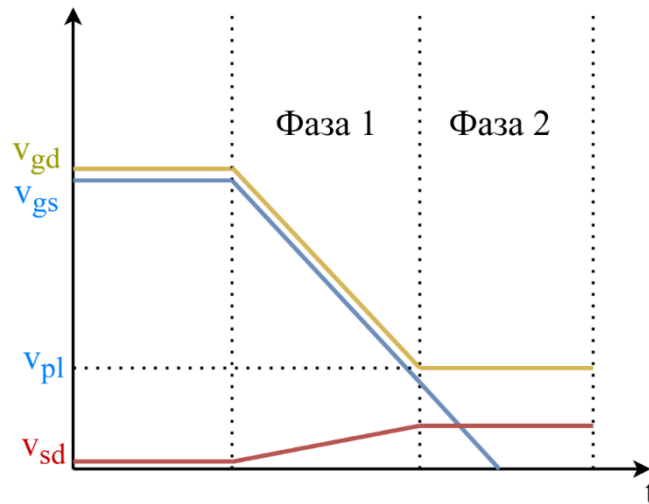
$$\frac{dv_{ds}}{dt} = \frac{I_L - I_{ch}}{C_{oss1} + C_{oss2}} \quad (3)$$

где су C_{oss1} и C_{oss2} излазне капацитивности прекидача и представљају збир C_{ds} и C_{gd} . Бројем један означен је горњи прекидач, а бројем два доњи прекидач у полумосној конфигурацији. Друга фаза траје док струја канала I_{ch} не падне на 0, 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 0 и то све док се не напуне паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} . Једначине наведене за другу фазу настављају да важе с тим да је сада $I_{ch} = 0$.

2.2.2 Друга врста комутација- искључење

Током друге врсте комутација (Слика 3.6), активни прекидач се искључује али пуна струја наставља да пролази кроз њега процесом инверзног провођења GaN прекидача. Овај процес приказан је на Слици 7. и подељен је у две фазе. До ове врсте комутације може доћи само ако је струја I_L негативна то јест има смер од потрошача ка прекидачком полумосту. Приликом ове комутације напон v_{sd} не расте до напона v_{dc} већ до напона инверзног провођења GaN прекидача. За уређаје мале снаге овај напон износи пар волти.



Слика 7. Друга врста комутација - искључење

Прва фаза је идентична као код првог сценарија и његове прве фазе описане у 2.2.1, тако да се напон v_{gs} мења по закону описаном једначином (1). Напон v_{gd} током ове фазе једнак је збиру напона v_{gs} и v_{sd} . Пад напона на проводном каналу v_{sd} је током ове фазе 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 4. 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:

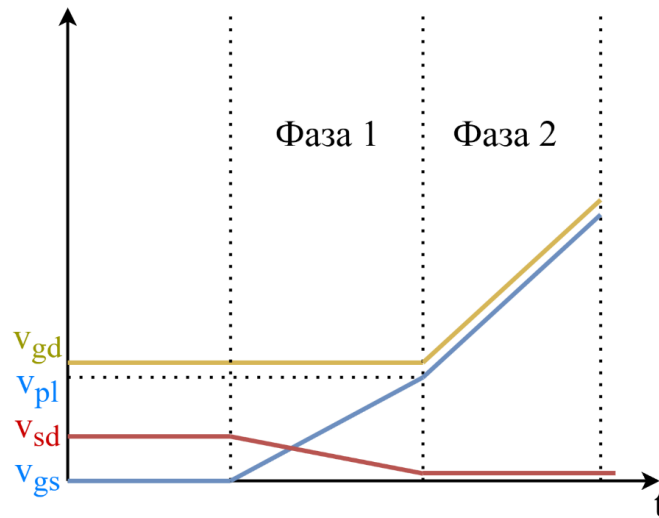
$$v_{sd} = v_{gd} + v_{sg} \quad (4)$$

2.3 Укључење прекидача

Приликом укључења прекидача поново се разликују две врсте комутација – када струја I_L има позитиван и када има негативан предзнак. Такође, сваки од наведених сценарија подељен је у фазе.

2.3.1 Прва врста комутација - укључење

Током укључења прекидача приликом прве врсте комутације Слика 3.а) подразумева се да су његове паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} испражњене и да кроз прекидач путем инверзног провођења пролази пуна струја I_L . Овај сценарио подељен је у две фазе као што је приказано на Слици 8.



Слика 8. Прва врста комутација - укључење

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:

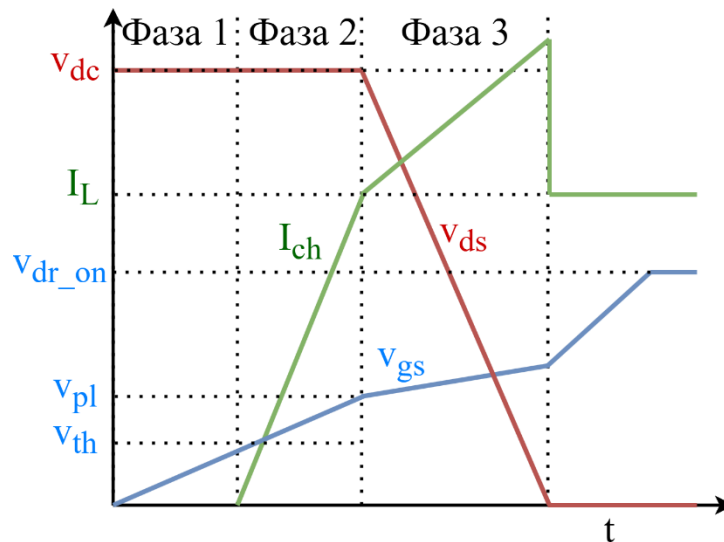
$$v_{gs} = v_{dr_on} (1 - e^{-\frac{t}{R_e C_{gs}}}) \quad (5)$$

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} .

2.3.2 Друга врста комутација – укључење

Током укључења прекидача приликом друге врсте комутације (Слика 3.6) паразитне капацитивности C_{ds} и C_{gd} су напуњене и током комутације се празне. Укључење у овом случају се одвија у три фазе приказане на Слици 9.

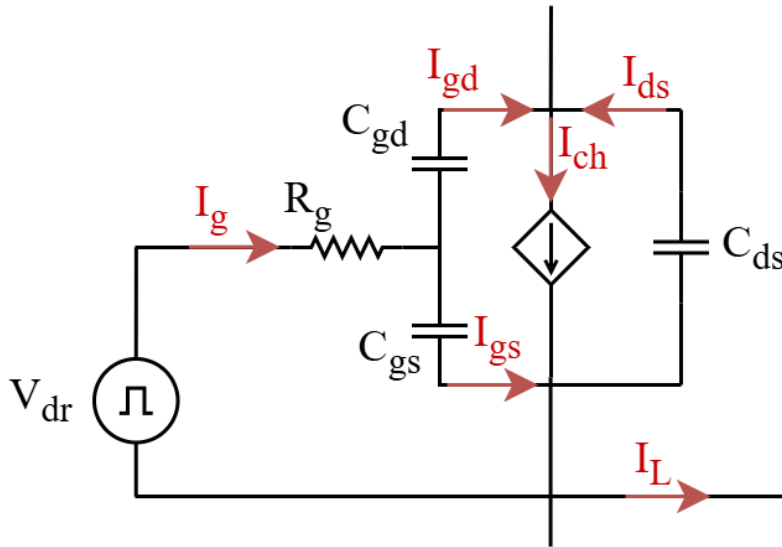


Слика 9. Други сценарио укључења

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 5. 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 док 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 комутација - укључење

Током ове фазе долази до значајно великог повећања струје активне области прекидача I_{ch} тако да је и напрезање који полупроводник трпи значајно већи од стреса устаљеног радног режима. Струја кроз активну област I_{ch} и даље је повезана са напонем v_{gs} преко графика датог на Слици 5.

Брзина промене напона v_{gs} сада је знатно успорена јер струја коју даје упаљач не пуни само капацитивност C_{gs} већ и празни капацитивност C_{gd} . Промена напона v_{gs} дата је са:

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

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

Да би се оценила снага губитака на прекидачу, потребно је одредити временске таласне облике величина од значаја у функцији радних режима. Како би одредили временски облик струје канала $I_{ch}(t)$ и пада напона на каналу $v_{ds}(t)$ потребно је решити систем диференцијалних једначина којим је резуловало Поглавље 2. Да би систем једначина (1)-(7) био решив потребно је из техничке документације прекидача искористити погодни скуп параметара. Параметри од интереса су по правилу описани у функцији радних режима као:

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

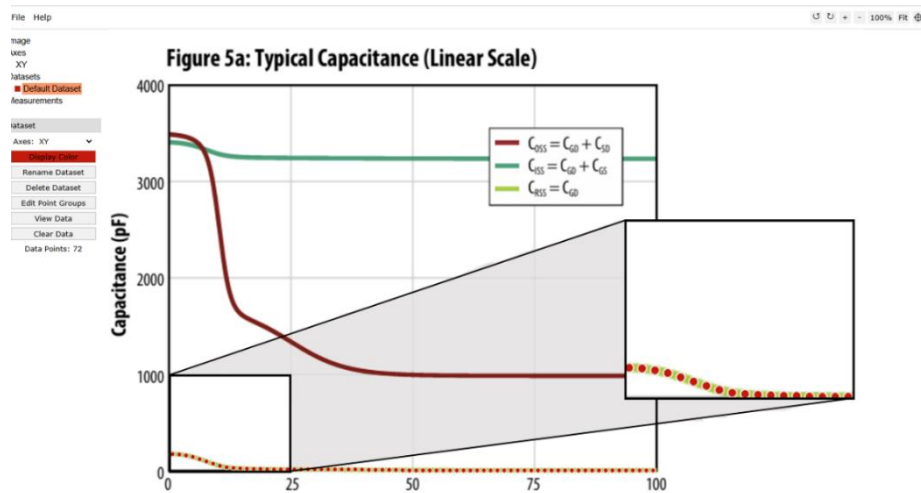
$I_{ch}(v_{gd})$ – зависност струје активне области прекидача од напона v_{gd} приликом инверзног провођења струје

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

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

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

Прикупљање и описивање наведених зависности спроведено је уз помоћ апликације *Automeris.io*. Пример коришћења овог алата дат је на Слици 12.



Слика 12. Коришћење алата Automeris.io

Овај алат омогућава дискретизацију криви из техничке документације. Црвене тачке представљају дискретне вредности које алат прикупља. Као резултат, добијене су потребне зависности $I_{ch}(v_{gs})$, $I_{ch}(v_{gd})$, $C_{ds}(v_{ds})$, $C_{gd}(v_{gd})$, $C_{gs}(v_{gs})$. Полазећи од систем диференцијалних једначина и формираних функционалних зависности параметара одређени су губици на прекидачима.

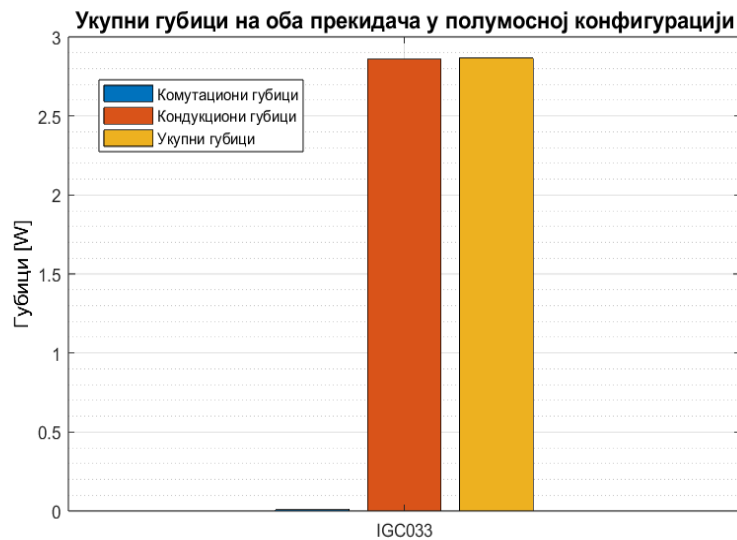
Губици на прекидачима одређени су, уважавајући кондукционе и комутационе губитке у *Matlab 2024* програмском пакету, са

$$P_{loss} = f_{PWM} \int_0^{T_{PWM}} I_{ch}(t) \cdot v_{ds}(t) dt \quad (8)$$

Процена губитака извршена је при следећим условима. Снага претварача $P = 1\text{kW}$, улазни напон је $V_{in} = 60\text{V}$ и фактор испуне $d = 0.75$, док су остали параметри од значаја дати у Табели 1. Укупни губици на оба прекидача у полумосној конфигурацији дати су на Сlici 13.

Табела 1. Параметри спуштача напона

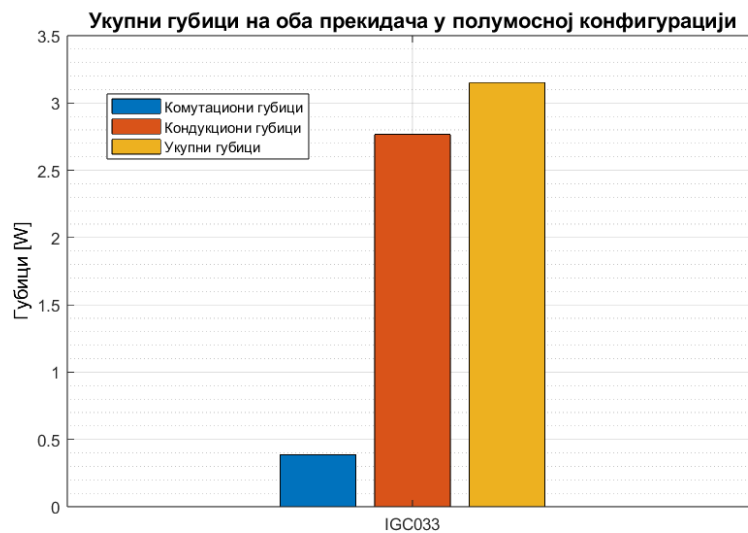
Параметар	Вредност	Јединица
Улазни напон	10-72	V
Излазни напон	5-70	V
Снага	1	kW
Учестаност прекидања	125	kHz
Мртво време	25	ns
Пригушница	1,5	μH
Прекидач	IGC033S1	



Слика 13. Укупни губици на прекидачима 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, 27A . 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 Сlike 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

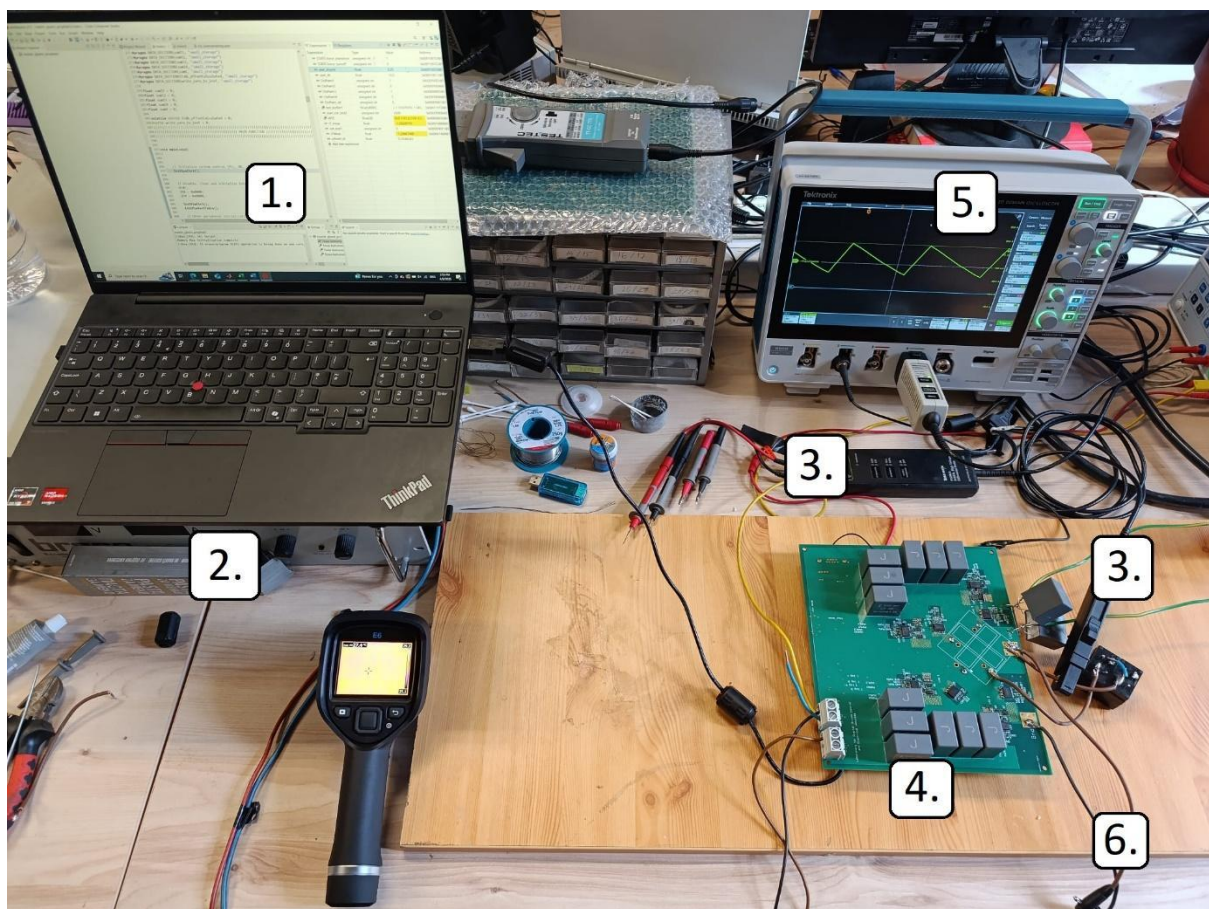
горњег прекидача се одвија по сценарију описаном у 2.3.1 и такође ствара минималне губитке. Битно је нагласити да када дође до комутације искључење горњег – укључење доњег, она се одвија поново по сценарију 2.2.1 па 2.3.1 и резултује минималним комутационим губицима. Комбинација комутације 2.2.1 и 2.3.1 може се остварити два пута током једне периоде само ако 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 случај где је таласност струје мања од струје потрошача I_L приказан је на Слици 14.



Слика 14. Укупни губици на оба прекидача у полумосној конфигурацији при не-мекком комутовању

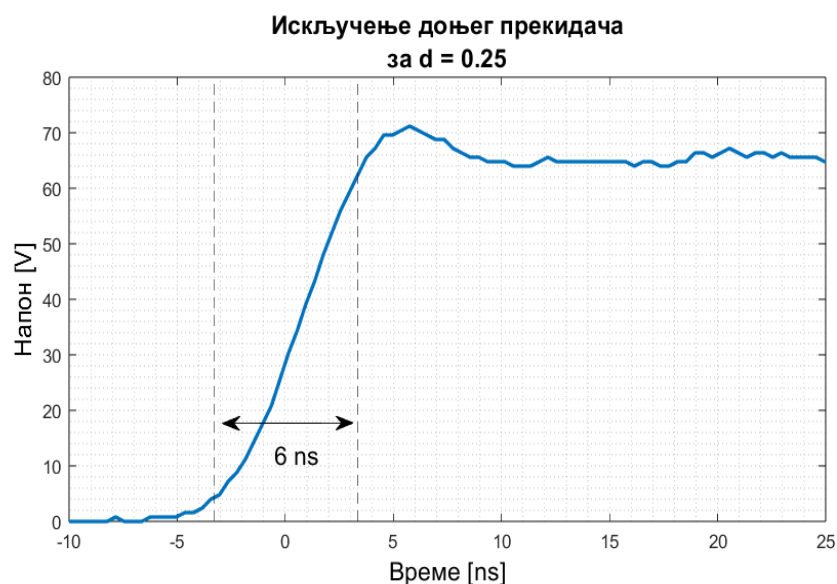
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Како би се испитао и верификовао начињени аналитички модел, испројектован је претварач спуштач напона снаге 1 kW. Кључни подаци који описују прототип претварача дати су у Табели 1. Валидација описаног модела комутација експериментално је вршена на поставци датој на Слици 15. Пројектовање и истривање вишефазног претварача спуштача напона спроведено је при Лабораторији за дигитално управљање претварачима и погонима Електротехничког факултета Универзитета у Београду. 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 Tektronix MDO34, (6) пасивни потрошач.



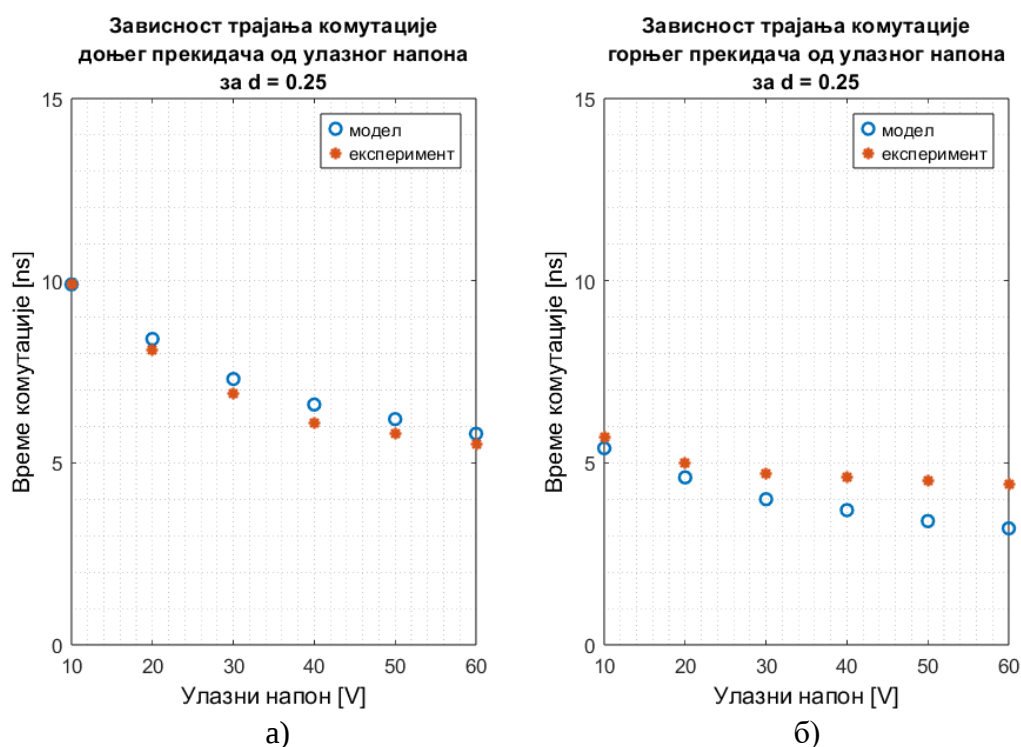
Слика 15. Експериментална поставка

Кључни параметар за верификацију развијеног модела је време трајања комутације. Трајање комутације испитивано је на поставци приказаној на Слици 15. 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 0V на V_{dc} , приликом искључења доњег прекидача Слика 16.



Слика 16. Промена напона V_{ds} приликом искључења доњег прекидача

Измерена су времена трајања комутација за доњи и горњи прекидач за 6 различитих улазних напона. Експериментални резултати су упоређени са временима трајања комутација добијених из модела у целом опсегу радном напона претварача. Добијени резултати представљени су на Сlici 17.



Слика 17. Зависност дужине трајања комутације од улазног напона

Са Сликe 17. 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 детаљно су 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 софтверског пакета *Automeris.io*, извучени су релевантни подаци из техничке документације конкретног прекидача. Тако извучени подаци искоришћени су приликом дискретног решавања једначина претходно описаног физичког модела. Направљена је скрипта у програмском пакету *Matlab* уз помоћ које су проучавани губици прекидача у различитим радним режимима. 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 поређења су трајања времена комутације којима резултују модел и експериментална поставка. Модел показује веома добро понашање и поклапање од преко 92% са експерименталним испитивањима трајња комутације доњег 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 просотр за даља истраживања.

6 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Alex Lidow, Michael de Rooij, John Glaser, "GaN Power Devices for Efficient Power Conversion", четvrto izdanje knjige
- [2] D. Christen and J. Biela, "Analytical Switching Loss Modeling Based on Datasheet Parameters for mosfets in a Half-Bridge," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 4, pp. 3700-3710, April 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2851068.
- [3] Zhiyuan Qi et al., "An Accurate Datasheet-Based Full-Characteristics Analytical Model of GaN HEMTs for Deadtime Optimization," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 7, pp. 7942-7955, July 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3044083.
- [4] H. Qin, X. Zheng, Z. Zhu and C. Gong, "Analytical Power Loss Model for GaN Transistors Based on Temperature and Parasitic Parameters," 2024 7th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE), Los Angeles, CA, USA, 2024, pp. 119-124, doi: 10.1109/CEEGE62093.2024.10744178.