

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ВТРАТ ПОТУЖНОСТІ В СИЛОВИХ ДІОДАХ І ТРАНЗИСТОРАХ

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,
аспіранти Д. А. Гордієнко, Г. А. Хоружевський, М. В. Філіп'єва

RESEARCH THE ACCURACY OF MODELING POWER LOSSES IN POWER DIODES AND TRANSISTORS

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate D. A. Hordiienko,
postgraduate H. A. Khoruzhevskiy, postgraduate M. V. Philipjeva

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.203.2023.277905>



Анотація. Наведено методологію моделювання статичних і динамічних втрат потужності в силових IGBT- та MOSFET-транзисторах у програмних середовищах Matlab і Multisim. Показано, що при моделюванні процесів комутації в силових транзисторах програмне середовище Matlab / Simulink не дає змогу визначати динамічні складові втрат потужності, а саме енергії ввімкнення транзистора, вимкнення транзистора, а також відновлення силових діодів. При цьому моделювання статичних втрат потужності силових діодів і транзисторів у Matlab / Simulink проводиться з суттєвою похибкою через некоректне подання вольт-амперних характеристик. Показано, що для більш коректного і точного моделювання роботи силових транзисторів, у тому числі втрат потужності в силових ключах, доцільніше проводити моделювання в програмному середовищі Multisim, що враховує більше 47 параметрів, включаючи температурні характеристики, паразитні вхідні та вихідні ємності і індуктивності, нелінійності вольт-амперних характеристик та інші. У програмному середовищі Multisim розроблено схему напівмостового інвертора з силовими MOSFET-транзисторами, керування якими виконує драйвер IR2104PBF. Показано, що на комутацію силових транзисторів суттєво впливають параметри мікросхеми драйвера, а саме величина накопичувального конденсатора драйвера, а також величина активного опору затворного резистора. Показано, що моделювання в Multisim коректно відображує перехідні процеси ввімкнення та вимкнення силових транзисторів і зворотного відновлення діодів, що дає змогу визначати динамічні втрати силових діодів і силових транзисторів.

Ключові слова: Matlab, Multisim, IGBT, MOSFET, моделювання, транзистор, втрати потужності, вольт-амперна характеристика.

Abstract. The methodology for modeling static and dynamic power losses in power IGBT and MOSFET transistors in the Matlab and Multisim software environments is given. It is shown that when modeling switching processes in power transistors, Matlab / Simulink does not allow determining the dynamic components of power losses, namely, the energy of turning on the transistor, the energy of turning off the transistor, as well as the recovery energy of power diodes. At the same time, the simulation of static power losses of power diodes and transistors in Matlab / Simulink is carried out with a significant error due to incorrect representation of the current-voltage characteristics. It is shown that for a more correct and accurate simulation of the operation of power

transistors, including power losses in power switches, it is more appropriate to conduct simulations in the Multisim software environment, which takes into account more than 47 parameters during simulation, including temperature characteristics, parasitic input and output capacitances and inductances, nonlinearities of current-voltage characteristics and others. In Multisim, a circuit of a half-bridge inverter with power MOSFETs controlled by the IR2104PBF driver has been developed. It is shown that the switching of power transistors is significantly influenced by the parameters of the driver microcircuit, namely the size of the storage capacitor of the driver, as well as the value of the active resistance of the gate resistor. It is shown that the simulation in Multisim correctly displays the transient processes of turning on and off power transistors and reverse recovery of diodes, which allows determining the dynamic losses of power transistors and power diodes.

Keywords: *Matlab, Multisim, IGBT, MOSFET, simulation, transistor, power losses, volt-ampere characteristic.*

Вступ. Одним з важливих напрямів дослідження напівпровідникових перетворювачів є визначення їхнього коефіцієнта корисної дії та складових втрат потужності, а також дослідження шляхів покращення енергетичної ефективності перетворювачів [1, 2].

При цьому одним із найпопулярніших інструментів при моделюванні силових напівпровідникових перетворювачів є програмне середовище Matlab. До його переваг можна віднести [3, 4]:

– універсальність, тобто можливість моделювання будь-яких силових схем, схем з малими струмами та будь-яких систем керування;

– зручний інтерфейс, що за рахунок створення блочних схем дає змогу досить просто, без знання мов програмування, створювати досить складні системи керування;

– потужний вбудований математичний апарат, що дає змогу проводити дуже багато різних видів аналізу, таких як Фур'є-аналіз, алгоритми синтезу цифрових та аналогових фільтрів, алгоритми синтезу регуляторів і т. п.

Тим не менше, при розв'язанні задач дослідження втрат потужності в силових напівпровідникових перетворювачах базовий функціонал програмного середовища Matlab / Simulink має досить суттєві недоліки, а саме силові ключі IGBT, MOSFET, GTO у Matlab / Simulink не відображують процеси зростання та спадання напруги в часі, через це

визначення динамічних втрат потужності в силових транзисторах практично неможливе. Також слід розуміти, що динамічні втрати потужності складають більшу частину відносно статичних втрат потужності [5, 6]. При цьому вольт-амперна характеристика *n-p*-переходу силових діодів і транзисторів в Matlab / Simulink моделюється коректно.

У програмах схемотехнічного моделювання типу SPICE, таких як Multisim, LT-spice, TINA, MicroCap, моделювання вольт-амперних процесів є більш точним [7, 8]. Моделі транзисторів у SPICE-моделюванні враховують час ввімкнення та вимкнення транзисторів і динамічні втрати.

Процес моделювання статичних і динамічних втрат у силових напівпровідникових транзисторах і діодах дає змогу визначити втрати потужності для будь-яких типів напівпровідникових перетворювачів з будь-якими типами модуляції [9, 10].

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку та результатах, частково опублікованих і роботах [11, 12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досить поширеними є програми для автоматичного розрахунку втрат потужності в силових IGBT, такі як MelcoSim, Semisel, Iposim і т. п. [13, 14]. Ці програми є досить зручним інструментом, проте вони дають змогу виконати автоматичний розрахунок втрат потужності

тільки для «стандартних» топологій (підвищувальний і знижувальний перетворювач постійної напруги, трифазний автономний інвертор напруги) зі «стандартними» алгоритмами керування (широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) з постійним коефіцієнтом заповнення, синусоїдальна ШІМ, просторово-векторна ШІМ). Недоліками існуючих програм є відсутність можливості моделювання «нестандартних» топологій, таких як силових активних фільтрів, активних випрямлячів з корекцією коефіцієнта потужності, багаторівневих перетворювачів і багатьох інших топологій, або стандартних топологій з нестандартними алгоритмами керування [15].

У роботі [16] наведено розрахунок втрат потужності в IGBT-транзисторі та розрахунок температури ключа. Однак у цій публікації не вказано, характеристики якого конкретного транзистора враховувалися при розрахунку. Крім того, у дослідженні не вказано, як саме були враховані динамічні втрати потужності.

У роботах [17, 18] наведено методики моделювання динамічних втрат у IGBT-транзисторах. Однак наведена методика має недоліки:

- залежності енергії ввімкнення E_{on} та енергії вимкнення E_{off} від струму емітера в IGBT-транзисторі подано лінійними залежностями, хоча реально ці характеристики мають вигляд, наближений до параболи;

- відсутність урахування втрат потужності у зворотному діоді транзистора.

Отже, питання подальшого пошуку оптимального програмного середовища для підвищення точності моделювання втрат потужності у силових діодах і транзисторах є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження точності моделювання втрат потужності в силових діодах і транзисторах, використовуючи програмні середовища Matlab та Multisim, що дасть змогу більш коректно і точно визначити динамічні

складові втрати потужності, а саме енергії ввімкнення транзистора, вимкнення транзистора та відновлення силових діодів. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- порівняти можливості та інструменти моделювання у програмних середовищах Matlab та Multisim;

- визначити методологію моделювання статичних і динамічних втрат потужності в силових транзисторах і діодах;

- навести результати моделювання роботи силового транзистора.

Основна частина дослідження. Моделювання втрат потужності силових діодів у програмному середовищі Matlab / Simulink. Силові діоди мають статичні та динамічні складові втрати потужності. Статичні втрати потужності визначаються як добуток напруги на діоді на струм, що протікає через діод [19, 20]:

$$P_{DC} = U_{VD} \cdot I_{VD}. \quad (1)$$

При цьому напруга на діоді залежить від величини струму та визначається за вольт-амперною характеристикою.

Значення падіння напруги, крім струму, також залежить від величини температури діодного модуля. На рис. 1 зображено реальні вольт-амперні характеристики силового діода RM1000DC-66F і вольт-амперна характеристика, за якою відбувається моделювання роботи діода програмним середовищем Matlab / Simulink.

З рис. 1 видно, що реальні вольт-амперні характеристики є кривими лініями, які мають параболічну форму, і заміна їх прямою так чи інакше призводить до похибок у розрахунках.

Вольт-амперна характеристика силового діода в Matlab / Simulink відображується як протиелектрорушійна сила (пряме падіння напруги, стандартне значення 0,8 В). При цьому через неспівпадіння базових форм характеристик виникає зона помилки моделювання, характерна для зони малих струмів діода.

Крім статичних втрат потужності, діод має динамічні втрати потужності [21, 22],

викликані наявністю енергії зворотного відновлення діода (рис. 2).

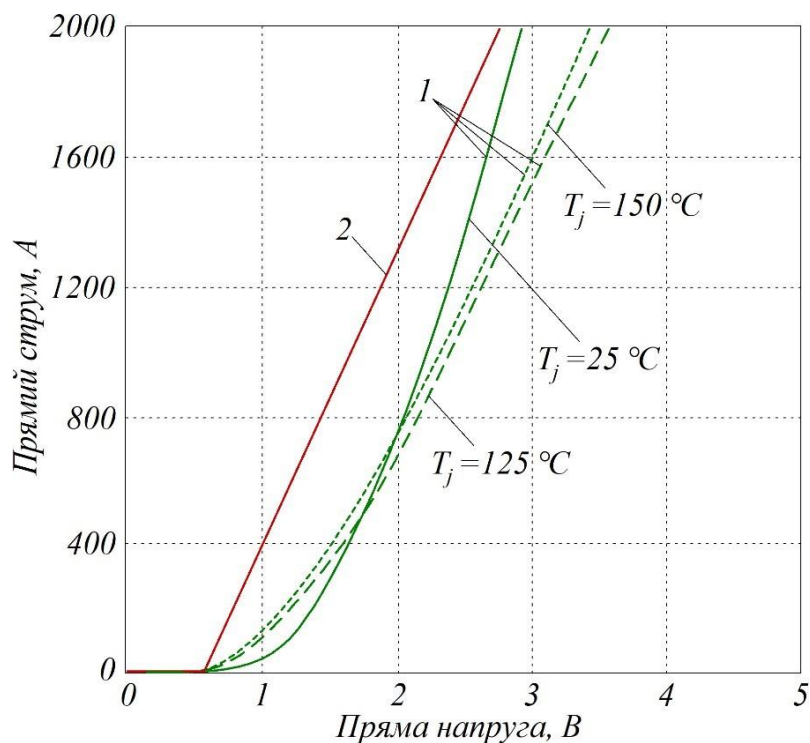


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики силового діода RM1000DC-66F з напругою 3,3 кВ та номінальним струмом 1000 А: 1 – реальні; 2 – змодельована в Matlab / Simulink

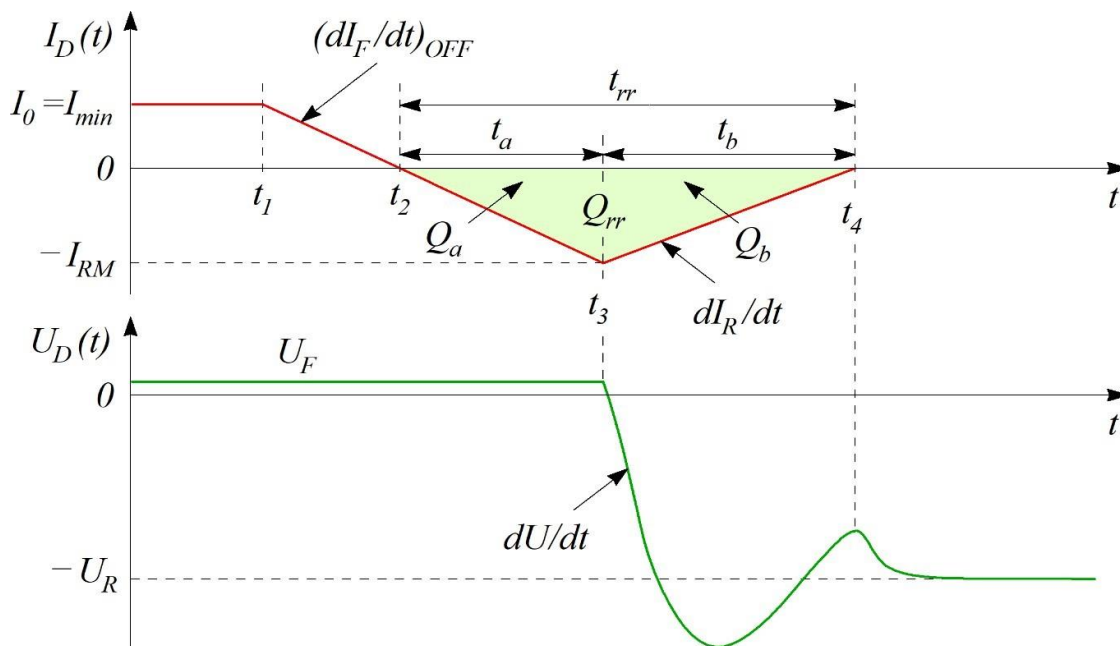


Рис. 2. Процес зворотного відновлення діода

При $t = t_1$ діод починає вимикатися, і струм зменшується з нахилом dI_F / dt , що визначається зовнішнім електричним колом. При цьому напруга на діоді залишається рівною U_F . Коли струм досягає нуля $t = t_2$, заряди, накопичені під час фази провідності, починають рекомбінувати, і напруга на діоді все ще дорівнює U_F протягом часу t_a , поки струм не досягне від'ємного значення, що позначається як I_{RM} (максимальний зворотний струм). У цей час напруга на діоді починає знижуватися, а неосновні носії – переміщуватися. Заряди продовжують переміщуватися протягом часу t_b з нахилом dI_R / dt залежно від технології діода та схеми. Протягом цього інтервалу часу (t_b) напруга коливається навколо значення зворотної напруги U_R перед стабілізацією. Після закінчення часу t_b діод можна вважати повністю вимкненим.

При цьому енергія, що розсіюється в діоді при зворотному відновленні, може бути визначена як інтеграл миттєвої потужності [23, 24]:

$$P_{rec} = \frac{1}{T_{sw}} \cdot \int_{t_1}^{t_4} U_{VD}(t) \cdot I_{VD} \cdot dt, \quad (2)$$

де T_{sw} – період в ШІМ;

t_1, t_4 – час, що відповідає інтервалам, зображеним на рис. 2.

При цьому виробники силових транзисторів наводять у документації на силові транзистори вже визначені залежності енергії відновлення від величини комутованого струму [25, 26]. Залежність енергії зворотного відновлення від комутованого струму силового діода RM1000DC-66F наведено на рис. 3.

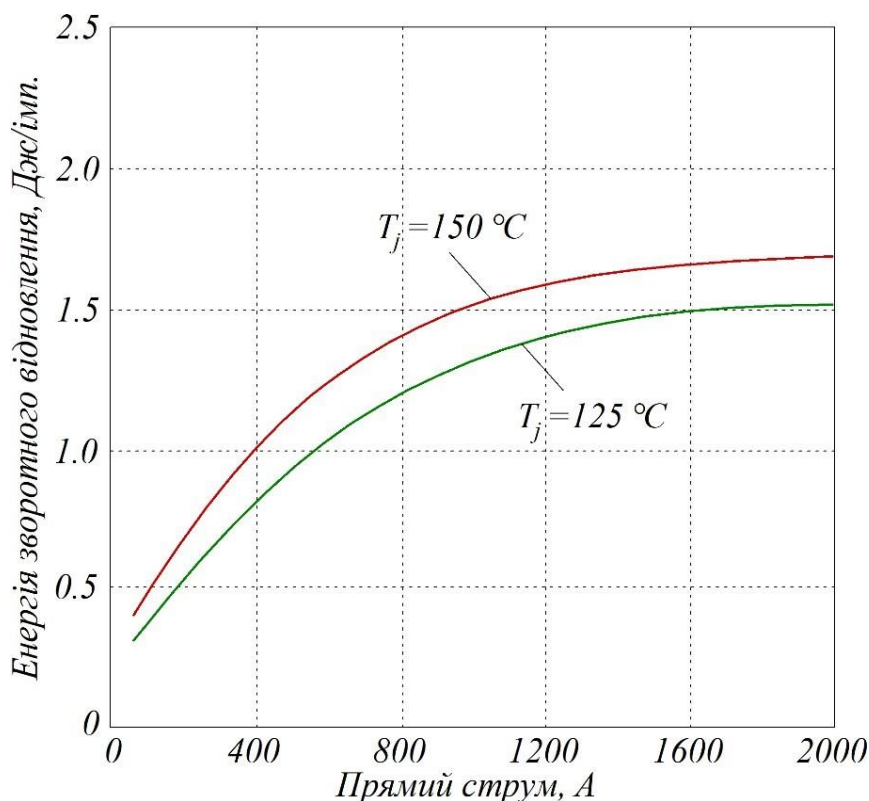


Рис. 3. Залежність енергії зворотного відновлення від комутованого струму силового діода RM1000DC-66F

Знаючи фактичне значення залежності енергії відновлення значення при ШІМ, режим роботи зі сталою частотою енергію зворотного відновлення діода може бути визначено як [27, 28]

$$P_{rec} = f_{PWM} \cdot E_{rec}, \quad (3)$$

де E_{rec} – енергія зворотного відновлення відповідно до технічних даних;
 f_{PWM} – частота комутації (частота відновлення діода).

При цьому в програмному середовищі Matlab / Simulink фізичні процеси втрат потужності зворотного відновлення силових діодів не враховуються.

Вольт-амперна характеристика IGBT і зворотного діода транзистора моделюється як звичайний активний опір, що складає 0,001 Ом (рис. 4).

З рис. 4 видно, що моделювання вольт-амперних характеристик IGBT-модуля призводить до суттєвих відхилень. Крім того, моделювання силових транзисторів у Matlab / Simulink не враховує динамічні втрати потужності в транзисторах, зумовлені часом увімкнення і вимкнення транзисторів. Це пов'язано з тим, що час перемикання силових транзисторів у Matlab / Simulink складає одну мінімальну дискрету часу, налаштовану при моделюванні (рис. 5).

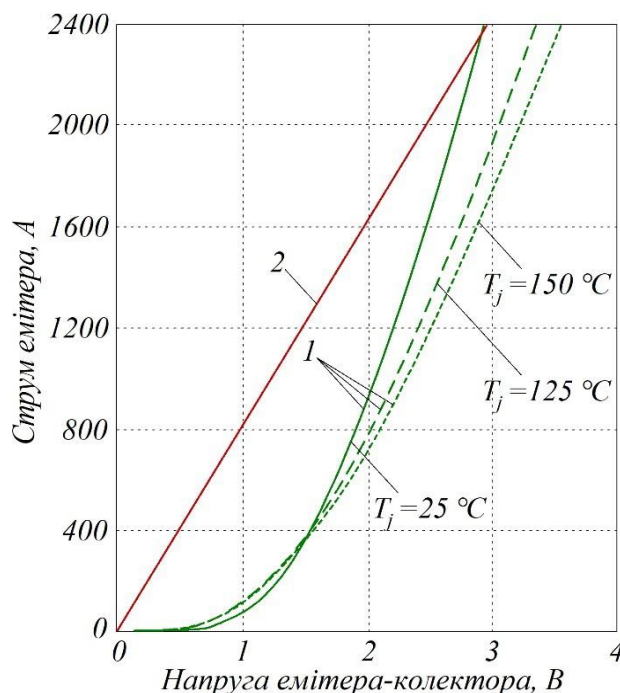
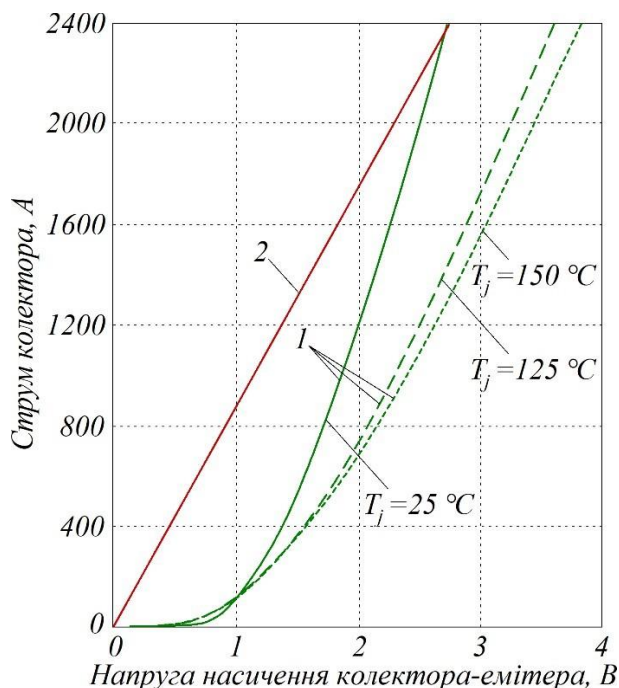


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики IGBT-транзистора та зворотного діода:
 1 – реальні; 2 – змодельовані в Matlab / Simulink

За результатами моделювання (рис. 5) видно, що програмне середовище Matlab / Simulink дає змогу визначати статичні втрати потужності, проте динамічні втрати потужності цим способом не визначаються.

Моделювання статичних і динамічних втрат потужності силових транзисторів у програмному середовищі NI Multisim. Програмне середовище NI Multisim використовує схожий з програмним середовищем Matlab принцип

моделювання електричних схем, а саме створення систем диференціальних рівнянь, що описують електричну схему, і розв'язання цієї системи чисельними

методами з заданим часом дискретизації [29, 30]. Проте розрахункові моделі суттєво відрізняються, оскільки NI Multisim використовує принцип SPICE-симуляції (рис. 6).

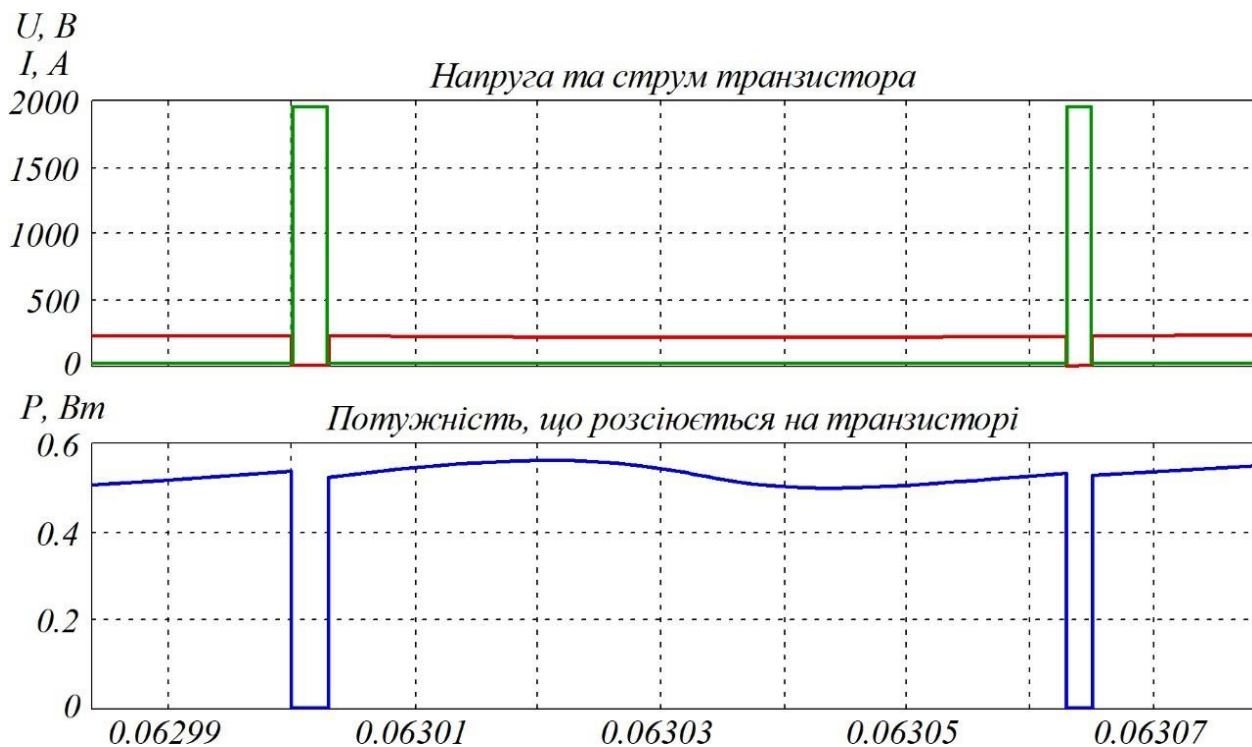


Рис. 5. Процес комутації силового IGBT-транзистора

Модель силових MOSFET- та IGBT-транзистора в NI Multisim є значно складнішою та враховує 47 параметрів транзистора (рис. 7).

Головними перевагами SPICE-симуляції силових транзисторів є врахування температурних залежностей, а також паразитних ємностей, індуктивностей, внутрішніх опорів і нелінійностей транзисторів.

При моделюванні враховувалися параметри транзистора типу IRFZ44NPbF відповідно до таблиці.

Імітаційну модель роботи силового MOSFET-транзистора, розроблену в програмному середовищі NI Multisim, наведено на рис. 8.

Результати моделювання струму та напруги силового транзистора IRFZ44N при комутації струму величиною 6 А наведено на рис. 9.

Процес зворотного відновлення діода в програмному середовищі NI Multisim наведено на рис. 10.

Згідно з моделюванням час увімкнення силового транзистора IRFZ44N склав 400 нс, а вимикання – 300 нс.

```
.SUBCKT IRFZ44N_MOS_ENH_N_1123

* Contains Proprietary Information *
* Which is The Property of *
* SYMMETRY OR ITS LICENSORS *
* Commercial Use or Resale Restricted *
* by Symmetry License Agreement *
* Model generated on Mar 7, 96
* Model format: SPICE3
* Symmetry POWER MOS Model (Version 1.0)
* External Node Designations
* Node 1 -> Drain
* Node 2 -> Gate
* Node 3 -> Source
M1 9 7 8 8 MM L=100u W=100u
* Default values used in MM:
* The voltage-dependent capacitances are
* not included. Other default values are:
* RS=0 RD=0 LD=0 CBD=0 CBS=0 CGBO=0
.MODEL MM NMOS LEVEL=1 IS=1e-32
+VIO=3.56214 LAMBDA=0 KP=39.3974
+CGSO=1.25255e-05 CGDO=2.2826e-07
RS 8 3 0.0133305
D1 3 1 MD
.MODEL MD D IS=9.64635e-13 RS=0.00967689 N=1.0|1377 BV=55
+IBV=10 EG=1.08658 XTI=2.9994 TT=0.0001
+CJO=1.39353e-09 VJ=0.5 M=0.42532 FC=0.5
RDS 3 1 1e+06
RD 9 1 0.0001
RG 2 7 2.20235
D2 4 5 MD1
* Default values used in MD1:
* RS=0 EG=1.11 XTI=3.0 TT=0
* BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD1 D IS=1e-32 N=50
+CJO=1.52875e-09 VJ=0.5 M=0.584414 FC=1e-08
D3 0 5 MD2
* Default values used in MD2:
* EG=1.11 XTI=3.0 TT=0 CJO=0
* BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD2 D IS=1e-10 N=0.408752 RS=3e-06
RL 5 10 1
FI2 7 9 VF12 -1
VF12 4 0 0
EVI6 10 0 9 7 1
CAP 11 10 2.06741e-09
FI1 7 9 VF11 -1
VF11 11 6 0
RCAP 6 10 1
D4 0 6 MD3
* Default values used in MD3:
* EG=1.11 XTI=3.0 TT=0 CJO=0
* RS=0 BV=infinite IBV=1mA
.MODEL MD3 D IS=1e-10 N=0.408752

< >
```

Рис. 6. SPICE-модель MOSFET типу IRFZ44NPbF

Edit Model

Model

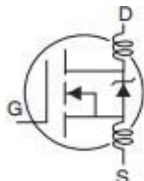
.model NMOS__TRANSISTORS_VIRTUAL__1 nmos

Tools Views

Name	Description	Value	Units	Use default
VTO	Threshold voltage	0	V	<input checked="" type="checkbox"/>
KP	Transconductance parameter	2e-5	A/V ²	<input checked="" type="checkbox"/>
GAMMA	Bulk threshold parameter	0	V ^{0.5}	<input checked="" type="checkbox"/>
PHI	Surface potential	0.6	V	<input checked="" type="checkbox"/>
LAMBDA	Channel length modulation	0	1/V	<input checked="" type="checkbox"/>
RD	Drain ohmic resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
RS	Source ohmic resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
RG	Gate ohmic resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
RB	Bulk ohmic resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
RDS	Drain source shunt resistance	0	Ω	<input checked="" type="checkbox"/>
CBD	Bulk-drain junction capacitance	0	F	<input checked="" type="checkbox"/>
CBS	Bulk-source junction capacitance	0	F	<input checked="" type="checkbox"/>
IS	Bulk junction saturation current	1e-14	A	<input checked="" type="checkbox"/>
PB	Bulk junction potential	0.8	V	<input checked="" type="checkbox"/>
CGSO	Gate-source overlap capacitance	0	F/m	<input checked="" type="checkbox"/>
CGDO	Gate-drain overlap capacitance	0	F/m	<input checked="" type="checkbox"/>
CGBO	Gate-bulk overlap capacitance	0	F/m	<input checked="" type="checkbox"/>
RSH	Sheet resistance	0	Ω/sq.	<input checked="" type="checkbox"/>
CJ	Bottom junction capacitance per area	0	F/m ²	<input checked="" type="checkbox"/>
MJ	Bottom grading coefficient	0.5		<input checked="" type="checkbox"/>
CJSW	Side junction capacitance per area	0	F/m	<input checked="" type="checkbox"/>
MJSW	Side grading coefficient	0.33		<input checked="" type="checkbox"/>
JS	Bulk junction saturation current density	0	F/m ²	<input checked="" type="checkbox"/>
TOX	Oxide thickness	4e-9	m	<input checked="" type="checkbox"/>
LD	Lateral diffusion	0	m	<input checked="" type="checkbox"/>
UD	Surface mobility	600	cm ² /...	<input checked="" type="checkbox"/>
FC	Forward bias junction fit parameter	0.5		<input checked="" type="checkbox"/>
NSUB	Substrate doping	0	1/cm ²	<input checked="" type="checkbox"/>
TPG	Gate type	1		<input checked="" type="checkbox"/>
NSS	Surface state density	0	1/cm ²	<input checked="" type="checkbox"/>
TNOM	Parameter measurement temperature	27	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
KF	Flicker noise coefficient	0		<input checked="" type="checkbox"/>
AF	Flicker noise exponent	1		<input checked="" type="checkbox"/>
L	Length	100e-6	m	<input checked="" type="checkbox"/>
W	Width	100e-6	m	<input checked="" type="checkbox"/>
WD	Lateral diffusion (Width)	0	m	<input checked="" type="checkbox"/>
N	Bulk P-N emission coefficient	1		<input checked="" type="checkbox"/>
JSSW	Bulk P-N saturation sidewall current/le...	0	A/m	<input checked="" type="checkbox"/>
PBSW	Bulk P-N sidewall potential	0	V	<input checked="" type="checkbox"/>
TT	Bulk p-n transit time	0	sec	<input checked="" type="checkbox"/>
NLEV	Noise equation selector	2		<input checked="" type="checkbox"/>
GDSNOI	Channel shot noise coefficient (used w...	1		<input checked="" type="checkbox"/>
T_MEASURED	Parameter measurement temperature	27	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
T_ABS	Absolute temperature	27	°C	<input checked="" type="checkbox"/>
T_REL_GLOBAL	Relative to current global temperature	0	°C	<input checked="" type="checkbox"/>

Рис. 7. Перелік параметрів SPICE-моделі MOSFET-транзистора та їхні значення

Електричні характеристики транзистора типу IRFZ44N при $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$

Параметр	Значення			Умова
	мін.	ном.	макс.	
Напруга пробою від стоку до джерела $V_{(BR)DSS}$, В	55	–	–	$U_{GS} = 0\text{ В}, I_D = 250\text{ мкА}$
Температурний коефіцієнт напруги пробою $\Delta V_{(BR)DSS} / \Delta T_j$, В / $^\circ\text{C}$	–	0,058	–	$25\text{ }^\circ\text{C}, I_D = 1\text{ мА}$
Статичний опір при ввімкненні $R_{DS(on)}$, мОм	–	–	17,5	$U_{GS} = 10\text{ В}, I_D = 25\text{ А}$
Порогова напруга затвора $V_{GS(th)}$, В	2	–	4	$U_{DS} = U_{GS}, I_D = 250\text{ мкА}$
Пряма провідність g_{fs}	19	–	–	$U_{DS} = 25\text{ В}, I_D = 25\text{ А}$
Струм витoku від стоку до джерела I_{DSS_25} , мкА	–	–	25	$U_{DS} = 55\text{ В}, U_{GS} = 0\text{ В}$
Струм витoku від стоку до джерела I_{DSS_250} , мкА	–	–	250	$U_{DS} = 44\text{ В}, U_{GS} = 0\text{ В}$
Прямий витік від затвора до джерела I_{GSS_f} , нА	–	–	100	$U_{GS} = 20\text{ В}$
Зворотний витік від затвора до джерела I_{GSS_r} , нА	–	–	–100	$U_{GS} = -20\text{ В}$
Загальний заряд затвора Q_g , нКл	–	–	63	$I_D = 25\text{ А},$ $U_{DS} = 44\text{ В},$ $U_{GS} = 10\text{ В}$
Заряд від затвора до джерела Q_{gs} , нКл	–	–	14	
Заряд від затвора до стоку Q_{gd} , нКл	–	–	23	
Час затримки ввімкнення $t_{d(on)}$, нс	–	12	–	$V_{DD} = 28\text{ В},$ $I_D = 25\text{ А},$ $R_G = 12\text{ Ом},$ $U_{GS} = 10\text{ В}$
Час підйому t_r , нс	–	60	–	
Час затримки вимкнення $t_{d(off)}$, нс	–	44	–	
Час падіння t_f , нс	–	45	–	
Внутрішня індуктивність стоку L_D , нГн	–	4,5	–	
Внутрішня індуктивність джерела L_S , нГн	–	7,5	–	
Вхідна ємність C_{iss} , пФ	–	1470	–	$U_{GS} = 0\text{ В},$ $U_{DS} = 44\text{ В},$ $f = 1\text{ МГц}$
Вихідна ємність C_{oss} , пФ	–	360	–	
Ємність зворотного перенесення C_{rss} , пФ	–	88	–	
Енергія одного імпульсу E_{AS} , мДж	–	530	150	$I_{AS} = 25\text{ А}, L = 0,47\text{ мГн}$

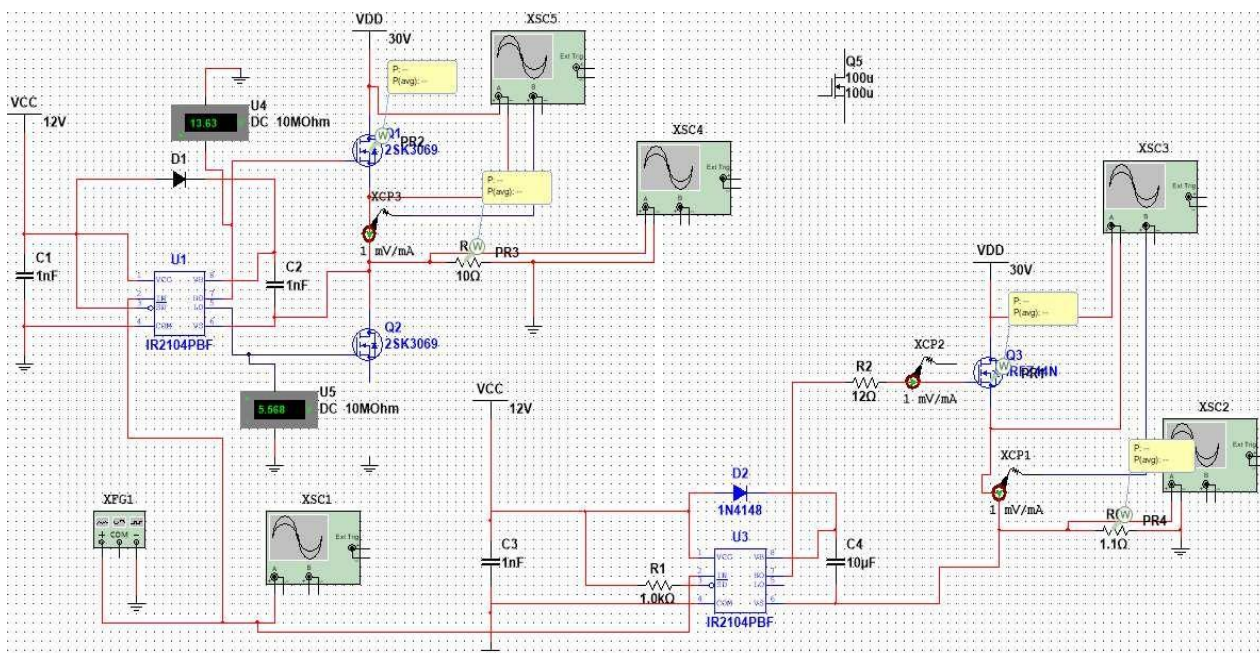


Рис. 8. Імітаційна модель силового MOSFET-транзистора при роботі з драйвером IR2104PBF

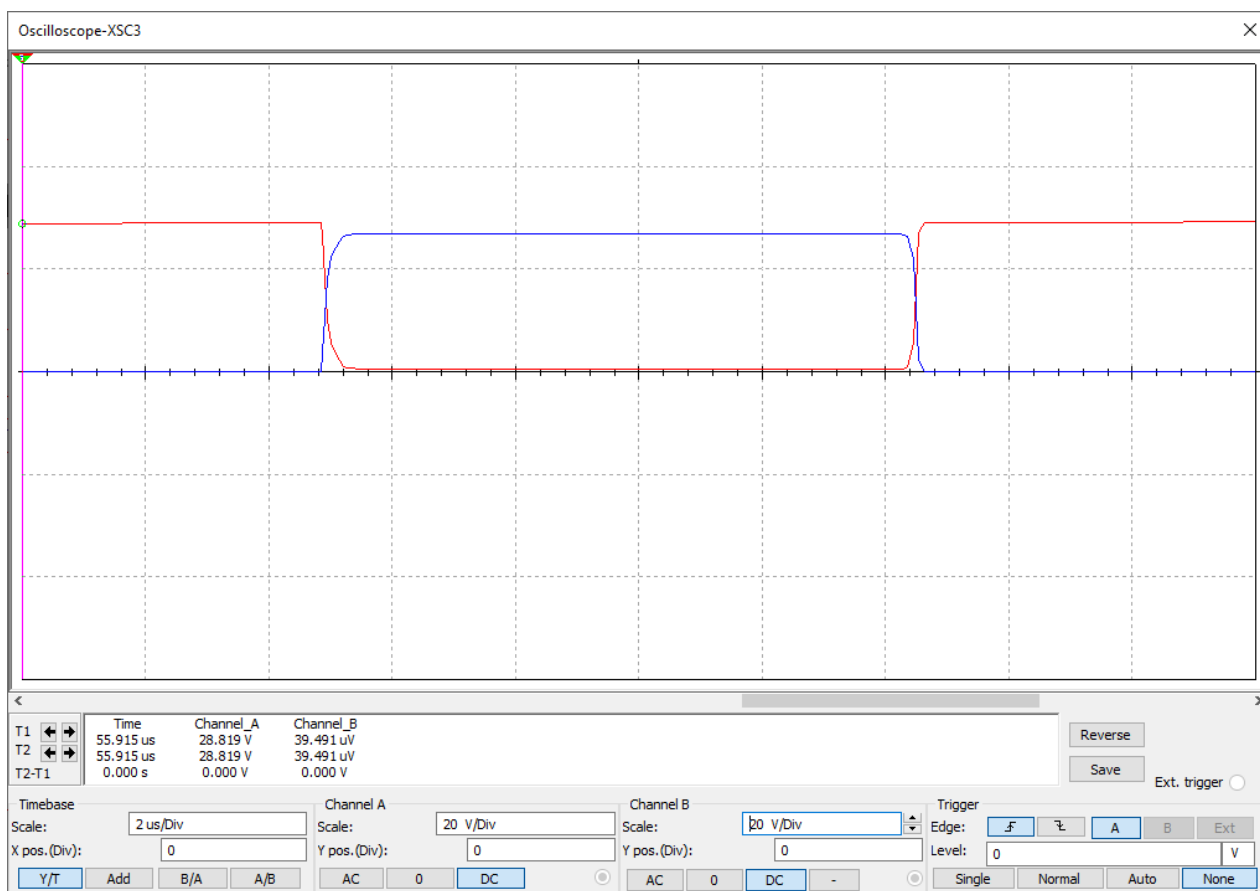


Рис. 9. Осцилограми струму та напруги силового транзистора IRFZ44N

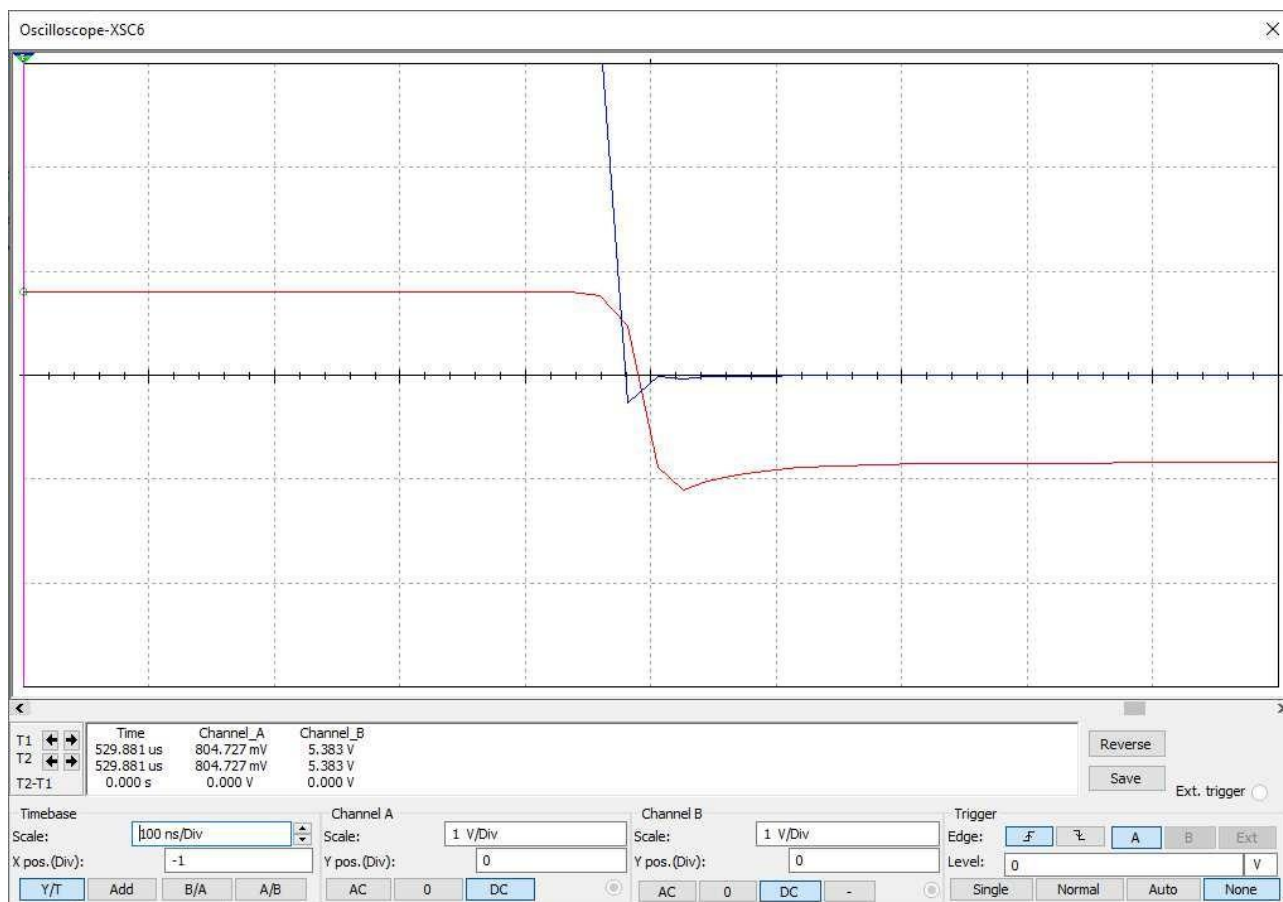


Рис. 10. Процес зворотного відновлення діода

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- проведено порівняння процесів моделювання силових транзисторів і діодів у програмних середовищах Matlab і Multisim і визначено, що Matlab / Simulink не дає змогу з високою точністю визначати динамічні втрати потужності;
- встановлено, що SPICE-моделювання дає змогу проводити симуляцію роботи силових транзисторів з

урахуванням значно більшої кількості параметрів і визначати як статичні, так і динамічні втрати потужності в силових транзисторах і діодах;

- наведені результати моделювання роботи силового транзистора підтвердили, що SPICE-моделювання дає змогу визначати вплив роботи драйвера, величини опору затвора, роботу снаберів, що впливає на час вмикання та вимикання транзистора, а також визначає динамічні втрати, що забезпечує оптимізацію величини втрат потужності.

Статтю підготовлено в рамках проведення дослідження за держбюджетною темою «Розробка наукових основ підвищення енергетичної ефективності та покращення якості електроенергії в електричних мережах» (державний реєстраційний номер 0121U109440).

Список використаних джерел

1. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
2. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 1, No. 8 (109). P. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
3. Hardan S. S., Hairik H. A., THEjeel R. Matlab/Simulink-Based Modeling of Typical Inductive Power Transfer (IPT) System. *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*. 2020. P. 86–92. DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236534.
4. Srikanta K., Ray O. Development of MATLAB-based User-Interactive Tool for Inductor Design in Power Converters. *2021 National Power Electronics Conference (NPEC)*. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/NPEC52100.2021.9672488.
5. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Mykhalkiv S., Hordiienko D., Shelest D., Khomenko I. Research of energy characteristics of three-phase voltage source inverters with modified pulse width modulation. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 422–427. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570071.
6. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Tugay D. V., Hordiienko D. A. Method for optimization of switching frequency in frequency converters. *Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. No. 1 (181). P. 103–110. DOI: 10.33271/nvngu/2021-1/103.
7. Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. 2016. P. 768–773. DOI: 10.1109/icmic.2016.7804216.
8. Gervasio F., Mastromauro R., Liserre M. Power losses analysis of two-levels and three-levels PWM inverters handling reactive power. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2015. P. 1123–1128. DOI: 10.1109/icit.2015.7125248.
9. Tran D., Lefebvre S., Avenas Y. Discrete Power Semiconductor Losses Versus Junction Temperature Estimation Based on Thermal Impedance Curves. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 79–87. DOI: 10.1109/TCPMT.2019.2939617.
10. Duan Y., Iannuzzo F., Blaabjerg F. A New Lumped-Charge Modeling Method for Power Semiconductor Devices. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, No. 4. P. 3989–3996. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2938104.
11. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D., Sushko D., Syniavskyi A., Shelest D. Thermal-powerloss approximation method for determination of efficiency in semiconductor devices. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 456–461. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926756.
12. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of Operating Modes and Features of Integration of Renewable Energy Sources into the Electric Power System. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
13. Yang H.-C., Simanjorang R., See K. Y. A Method of Junction Temperature Estimation for SiC Power MOSFETs via Turn-on Saturation Current Measurement. *IEEJ Journal of Industry Applications*. 2019. Vol. 8. P. 306–313. DOI: 10.1541/ieejia.8.306.

14. Tuluhong A., Wang W., Li Y., Wang H., Xu L. Research on Modelling and Stability Characteristics of Electric Traffic Energy System Based on ZVS-DAB Converter. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2020. P. 1–10. DOI: 10.1155/2020/5450628.
15. Donuk H., Gumus B. A New Soft-Switching Control Technique and Loss Analysis for Parallel Resonant DC-Link Inverter Connected to the Grid. *Tehnicki Vjesnik-technical Gazette*. 2022. DOI: 10.17559/tv-20220105203656.
16. Pillay T., Saha A. Analysis and simulation of flying capacitor multilevel inverter using PDPWM strategy. *International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*. 2017. P. 1061–1070.
17. Ahmadzadeh T., Sabahi M., Babaei M. Modified PWM control method for neutral point clamped multilevel inverters. *14th International Conference on Electrical Engineering / Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. 2017. P. 765–768.
18. Saito W., Nishizawa S. Alternated Trench-Gate IGBT for Low Loss and Suppressing Negative Gate Capacitance. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2020. Vol. 67, No. 8. P. 3285–3290. DOI: 10.1109/TED.2020.3002510.
19. Amirpour S., Thiringer T., Hagstedt D. Power Loss Analysis in a SiC/IGBT Propulsion Inverter Including Blanking Time, MOSFET's Reverse Conduction and the Effect of Thermal Feedback Using a PMSM Model. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*. 2020. P. 1424–1430. DOI: 10.1109/IECON43393.2020.9254297.
20. Josias W., Tavares G., Soares G., Almeida P., Braga H. Switching losses prediction methods oriented to power MOSFETs – a review. *IET Power Electron*. 2020. Vol. 13, Is. 14. P. 2960–2970. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.1003.
21. Kumar A., Vechalapu K., Bhattacharya S., Veliadis V., Brunt E., Grider D., Sabri S., Hull B. Effect of capacitive current on reverse recovery of body diode of 10kV SiC MOSFETs and external 10kV SiC JBS diodes. *2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA)*. 2017. P. 208–212. DOI: 10.1109/WiPDA.2017.8170548.
22. Za'im R., Jamaludin J., Yusof Y., Abd Rahim N. High Step-Up Flyback with Low-Overshoot Voltage Stress on Secondary GaN Rectifier. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 5092. DOI: 10.3390/en15145092.
23. Xu Y., Ho C., Ghosh A., Muthumuni D. An Electrical Transient Model of IGBT-Diode Switching Cell for Power Semiconductor Loss Estimation in Electromagnetic Transient Simulation. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2020. Vol. 35, No. 3. P. 2979–2989. DOI: 10.1109/TPEL.2019.2929113.
24. Turzynski M., Bachman S., Jasinski M., Piasecki S., Rylko M., Chiu H.-J., Kuo S.-H., Chang Y.-C. Analytical Estimation of Power Losses in a Dual Active Bridge Converter Controlled with a Single-Phase Shift Switching Scheme. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 8262. DOI: 10.3390/en15218262.
25. Luo C., Li Z., Lu T.-T., Xu J., Guo G.-P. MOSFET characterization and modeling at cryogenic temperatures. *Cryogenics*. 2019. Vol. 98. P. 12–17.
26. Pourghaderi M. A. Universality of short-channel effects on ultrascaled MOSFET performance. *IEEE Electron Device Lett*. 2018. Vol. 39, No. 2. P. 168–171.
27. Mohammadi M. R. A Lossless Turn-on Snubber for Reducing Diode Reverse Recovery Losses in Bidirectional Buck/Boost Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, No. 2. P. 1396–1399. DOI: 10.1109/TIE.2019.2901642.
28. Pulvirenti M., Sciacca A. G., Salvo L., Nania M., Scelba G., Scarcella G. Body Diode Reverse Recovery Effects on SiC MOSFET Half-Bridge Converters. *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. P. 2871–2877. DOI: 10.1109/ECCE44975.2020.9236330.

29. Yongmao C., Jiayu W., Tianyu L. Control operation circuit system design and simulation based on Multisim 13.0. *2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. 2020. P. 2331–2335. DOI: 10.1109/ICISCE50968.2020.00457.

30. Fan Y., Zhang M., Li J. Improvement of Power Factor and its Multisim Simulation. *2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS)*. 2020. P. 766–769. DOI: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202231.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20.

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Хоружевський Григорій Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Філіп'єва Марина Віталіївна, аспірантка кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (066) 578-41-96.

E-mail: marifil2603@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6499-7493.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-76.

E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andriiovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20.

E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12.

E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Khoruzhevskiy Hryhorii Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 000-23-34.

E-mail: khoruzhevskiy@gmail.com. ORCID iD: 0000-0003-2042-4938.

Philipjeva Maryna Vitaliyivna, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (066) 578-41-96.

E-mail: marifil2603@gmail.com. ORCID iD: 0000-0001-6499-7493.

Статтю прийнято 03.03.2023 р.