

АРСЕНЮК ДМИТРО

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0003-2022-0599>  
e-mail: [arsedmitry@gmail.com](mailto:arsedmitry@gmail.com)

ЗІНЬКОВСЬКИЙ ЮРІЙ

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0003-4234-3549>  
e-mail: [yuzin@ukr.net](mailto:yuzin@ukr.net)

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОМУТАЦІЙНИХ ВТРАТ У ШИРОКОЗОННИХ НІТРИД ГАЛІЄВИХ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРАХ

У цій статті подано поглиблений аналіз комутаційних втрат в польових транзисторах (FET) на основі нітриду галію (GaN) порівняно з їх аналогами. Метою роботи є ретельна оцінка втрат та аналіз їх впливу на енергоефективність, надавши важливу інформацію для вдосконалення систем силової електроніки. Напівпровідникові прилади з широкою забороненою зоною стають потенційними конкурентами для силової електроніки завдяки їх стійкості до підвищених напруг та температур. Такі якості роблять їх безцінними у різних галузях, включаючи відновлювані джерела енергії, електромобілі та промислову автоматизацію. Забезпечення їхньої ефективної роботи має першорядне значення для розширення систем перетворення енергії та скорочення втрат енергії.

Представлено детальне порівняльне дослідження, яке порівнює комутаційні втрати в напівпровідникових приладах з широкою забороненою зоною та кремнієвих аналогах. Отримані дані підкреслюють явно виражені переваги напівпровідникових широкозонних приладів з упором на польові транзистори GaN в скороченні комутаційних втрат. Пристрої GaN демонструють помітно менші втрати при вмиканні та вимиканні, що сприяє підвищенню енергоефективності у багатьох сферах. Помітне зниження опору у відкритому стані призводить до значного зменшення втрат на провідність та перемикання, що підкреслює їхню привабливість для високочастотних перетворювачів енергії.

У статті розглядається ключовий характер енергоефективності, ілюструючи, як зниження втрат перемикання в польових транзисторах GaN збільшує загальну ефективність системи. Це наголошує на потенціалі широкозонних напівпровідникових пристроїв у підвищенні продуктивності та енергозбереженні в силовій електроніці, включаючи електромобілі, системи відновлюваних джерел енергії та телекомунікаційні енергетичні інфраструктури.

Ключові слова: нітрид галію, GaN, широкозонні напівпровідники, wide bandgap semiconductors.

ARSENIUK DMYTRO

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ZINKOVSKYI YURI

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## COMPARATIVE ANALYSIS OF SWITCHING LOSSES IN WIDE BANDGAP GALLIUM NITRIDE FIELD-EFFECT TRANSISTORS

This paper delivers an in-depth analysis of switching losses in gallium nitride (GaN) field-effect transistors (FETs) vis-à-vis counterparts. The objective is to meticulously quantify these losses and evaluate their repercussions on energy efficiency, furnishing pivotal insights for refining power electronic systems. Wide bandgap semiconductor devices are emerging as potent contenders for power electronics owing to their resilience against elevated voltages and temperatures. Such traits render them invaluable in diverse arenas, including renewable energy, electric vehicles, and industrial automation. Ensuring their proficient operation is paramount to the augmentation of energy conversion systems and curtailment of energy wastage.

A nuanced comparative study contrasting switching losses in wideband semiconductor and silicon devices is presented. The ensuing data underscores the pronounced benefits of wide-bandgap semiconductor devices, with an emphasis on GaN field-effect transistors, in curtailing switching losses. GaN devices manifest notably diminished turn-on and turn-off losses, catalyzing enhanced energy efficiency across multiple domains. The marked decrease in on-state resistance culminates in substantially fewer conduction and switching losses, accentuating their appeal for high-frequency operations.

The discourse underscores the pivotal nature of energy efficiency, illustrating how the mitigated switching losses in GaN field-effect transistors amplify overall system efficacy. This accentuates the potential of wide-bandgap semiconductor devices in bolstering performance and energy conservation within power electronics, spanning electric vehicles, renewable energy systems, and telecommunication power infrastructures.

Keywords: gallium nitride, GaN, wide bandgap semiconductors, switching losses, power electronics

### Постановка проблеми

Широкозонні напівпровідникові пристрої, прикладом яких є нітрид галію (GaN), зробили революцію в силовій електроніці. Їх чудові властивості, включаючи високу пробивну напругу та здатність до швидкого перемикання, зробили їх незамінними в різних сферах застосування: від систем відновлюваної енергії до електромобілів і промислової автоматизації. Однак чудові переваги широкозонних напівпровідникових приладів не позбавили своїх проблем. Однією з найбільш серйозних перешкод при їх використанні є наявність втрати при комутації

Суть проблеми полягає в переходах, які ці пристрої здійснюють між увімкненим і вимкненим станами. Ці процеси перемикання, хоч і важливі для регулювання потоку електроенергії, призводять до втрат енергії, які можуть значно знизити ефективність системи. Таким чином, розуміння, кількісна оцінка та

пом'якшення цих втрат при комутації стали першочерговими у пошуках оптимального перетворення та використання енергії. Ця стаття розпочинає комплексний аналіз багатогранної проблеми втрат при перемиканні в широкозонних напівпровідникових пристроях, проливаючи світло на складні чинники та пропонуючи розуміння стратегій мінімізації цих втрат. У цьому прагненні він приєднується до жвавої та динамічної галузі досліджень, присвячених розкриттю повного потенціалу широкозонних напівпровідників, одночасно вирішуючи проблеми, пов'язані з їх роботою.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Швидкий прогрес силової електроніки ознаменувався значними досягненнями у галузі створення польових транзисторів (FET) та біполярних (IGBT) транзисторів. Недавні дослідження були зосереджені на розумінні та оптимізації розрахунків втрат у цих пристроях з метою підвищення їхньої продуктивності та надійності.

У дослідженні [1] автори представили аналітичну модель, яка ретельно враховує різні параметри карбід кремнієвих (SiC) польових транзисторів. Ця модель заснована на високоточному припасуванні передавальних характеристик з використанням функції Гауса. Крім того, емпірично була виміряна динамічна паразитна ємність затвор-стік і виконана апроксимація тривимірної кривої вихідних характеристик для точного подання опору у відкритому стані.

Інше ключове дослідження [2], наголошує на аналітичній методології, яка поєднує втрати на провідність і комутацію напівпровідників. Дослідження також враховують втрати високочастотного трансформатора. Підхід розроблений таким чином, що всі параметри, необхідні для розрахунку втрат, можна отримати з таблиць даних виробників, або вивести з простих вимірів.

У дослідженні [3] досліджуються чутливі параметри активного керування напругою на затворі. У дослідженні представлено технологію активного керування напруги на затворі багаторівневого синтезу. Ця технологія призначена для корекції форми сигналу на затворі, створюючи певні провали або опуклості в стандартній формі сигналу керуючої напруги на певну тривалість.

Порівняльне дослідження [4] пропонує зіставлення теплових характеристик карбід кремнієвих польових транзисторів та кремнієвих IGBT. Стаття починається з аналізу розрахунків втрат та поширення обох пристроїв. Згодом коливання температури переходу SiC MOSFET і Si IGBT розраховуються з використанням методу мережі термічного опору, що забезпечує повне розуміння їхньої теплової динаміки.

Підсумовуючи, можна сказати, що нещодавні досягнення з розрахунку втрат польових і біполярних транзисторів зробили значний внесок у підвищення продуктивності та надійності цих пристроїв. Методології та методи, розкриті у вищезгаданих дослідженнях, забезпечують всебічне розуміння цієї галузі, передвіщаючи перспективну траєкторію майбутнього силової електроніки.

**Метою роботи** є ретельна оцінка комутаційних втрат польових транзисторів на основі нітриду галію та аналіз їх впливу на енергоефективність.

#### Виклад основного матеріалу

GaN являє собою напівпровідниковий матеріал, який є напівпровідником з широкою забороненою зоною. На відміну від інших напівпровідників групи III, таких як арсенід галію або фосфат галію (GaP), матеріал нітриду галію має кристалічну структуру гексагонального типу вюрцит. Ця структура хімічно та механічно стійка, у тому числі до високих температур.

Ширина забороненої зони  $E_G$  напівпровідника визначається міцністю хімічних зв'язків між атомами у ґратах. Велике значення призводить до невеликих власних струмів витоку та працюють на більш високих робочих температурах. Нітрид галію має ширину забороненої зони 3.4 eV, тоді як ширина забороненої зони кремнію становить лише 1.1 eV [5]. Таким чином, порівняно з іншими нітридами групи III, такими як арсенід галію (GaAs) з шириною забороненої зони 1.43 eV і фосфід галію (GaP) з шириною забороненої зони 2.2 eV, пристрої на основі GaN мають підвищену напругу пробою і високу термостабільність при роботі на високих температурах.

Хімічні зв'язки, що спричиняють збільшення ширини забороненої зони, призводять до збільшення критичного електричного поля  $E_{crit}$ .

Напруга пробою  $V_{BR}$  транзистора пропорційна ширині дрейфової зони  $W_{drift}$ :

$$W_{drift} = \frac{2V_{BR}}{E_{crit}} \quad (1)$$

Для матеріалів з широкою забороненою зоною ширина дрейфової зони менша, ніж у кремнії при тій же напрузі пробою. Критичне електричне поле для кристалів цієї групи, які зазвичай використовуються в транзисторах, таких як нітрид галію, становить  $\sim 3.3$  МВ/см, у той час як для кремнію всього  $\sim 0.23$  МВ/см, для арсеніду галію  $\sim 0.6$  МВ/см. Величина критичного електричного поля кристала GaN вище, ніж у кремнію та подібних напівпровідників з нітридами III групи, але кількість носіїв заряду в дрейфовій області може бути у 100 разів більшою.

Структура вюрциту визначає п'єзоелектричні властивості з дуже високою провідністю порівняно з кремнієм. Нарощуючи тонкий шар алюміній галій нітриду (AlGaN) на поверхню кристала GaN, створюється гетероструктура двовимірного електронного газу (2DEG). Ця гетероструктура визначається високою

провідністю частково завдяки утриманню електронів у дуже малій області на межі розділу. Це підвищує електричну провідність електронів до 1500-2000 см<sup>2</sup>/В з області 2DEG [6].

Для імпульсних перетворювачів енергії такі переваги як можливість функціонувати при значно більших напругах дозволяють збільшити максимальну частоту перемикавання, знизити втрати при перемиканні, що дозволяє значно розширити сферу застосування високочастотних імпульсних перетворювачів.

Однією із значних складових втрат у високочастотних імпульсних перетворювачах є втрати при комутації [7, 8].

Значення потужності розсіювання польових транзисторів це втрати енергії, що виникають при роботі, втрати провідності, комутації, діодних втрат, тощо.

Втрати провідності є:

$$P_{cond} = I_{rms}^2 R_{DS}(ON), \tag{2}$$

де  $R_{DS}(ON)$  – опір у включеному стані.  $R_{DS}(ON)$  опір транзистора у відкритому стані є сумою опорів всіх елементів, з яких складається пристрій,  $I_{rms}$  — середньоквадратичний струм.

Опір описується як:

$$R_{DS}(ON) = W / q\mu_n N_D, \tag{3}$$

де  $W$  – ширина дрейфової зони,  $q$  – заряд електрона,  $\mu_n$  – рухливість електронів,  $N_D$  – концентрація електронів у областях провідності.

Комбінуючи (2) і (3) отримуємо залежність опору відкритого каналу від напруги пробою  $V_{BR}$ :

$$R_{DS}(ON) = 4V_{BR} / \epsilon\epsilon_0 E^3, \tag{4}$$

де  $\epsilon\epsilon_0$  — абсолютна та відносна діелектрична проникність матеріалу.

Відповідно, орієнтовані оцінки меж опору у відкритому стані для різних транзисторів:

$$\begin{aligned} R_{DS}(ON) &= 5.93 \cdot 10^{-9} V_{BR}^{2.5} \text{ — Si} \\ R_{DS}(ON) &= 2.4 \cdot 10^{-12} V_{BR}^{2.5} \text{ — GaN} \\ R_{DS}(ON) &= 8.3 \cdot 10^{-10} V_{BR}^{2.5} \text{ — GaAs} \end{aligned} \tag{5}$$

На рис. 1 видно значне збільшення провідності нітриду галію в порівнянні з іншими матеріалами (на кілька порядків), що призводить до зменшення втрат провідності  $P_{cond}$  у відкритому стані.

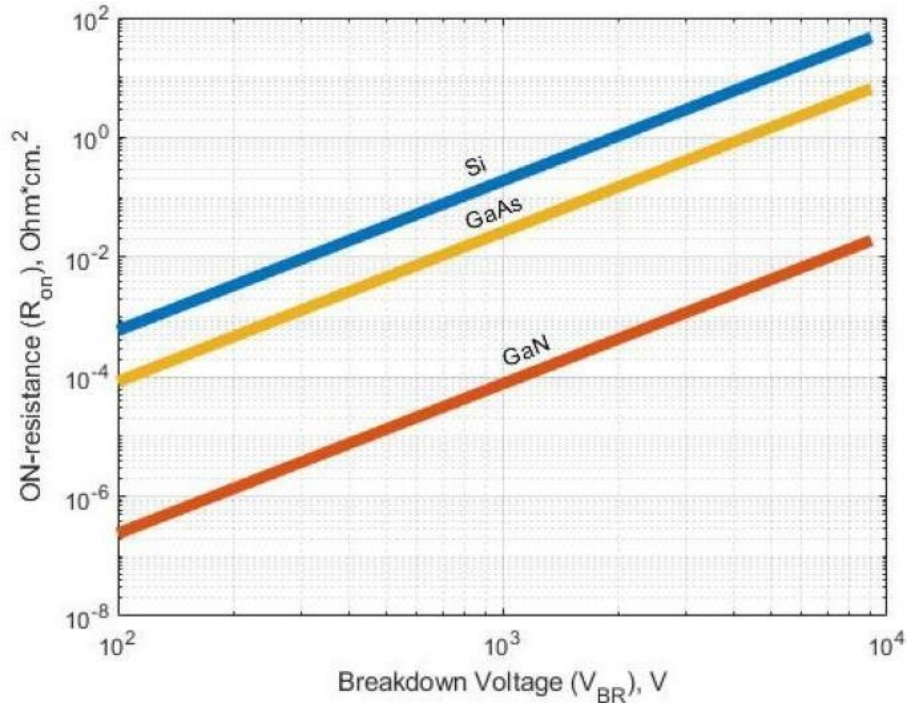


Рис. 1. Значення опору відкритого каналу транзисторів залежно від напруги пробою

Пропорційне значення  $R_{DS}(ON) \propto V_{BR}^{2.5}$  більше, ніж із (5). Для більш високого  $V_{BR}$  необхідно зменшити  $N_D$  із дрейфового шару. В результаті  $R_{DS}(ON)$  швидко зростає.

Комутаційні втрати розраховуються через енергію  $E_{sw}$  та частоту перемикавання  $f_{sw}$ :

$$P_{sw} = E_{sw} \cdot f_{sw} \tag{6}$$

При роботі транзистора на навантаження енергія перемикання визначається через напругу стік-витік  $V_{DS}$  і струм стоку  $i_d$ :

$$E_{sw} = 2 \int_0^{t_{on}} V_{DS}(t) \cdot i_d(t) dt \tag{7}$$

Якщо значення  $V_{DS}$  та  $i_d$  змінюються лінійно, то втрати потужності при комутації можна розраховувати як:

$$P_{sw} = V_{DS} \cdot I_d (t_{rise} + t_{fall}) f_{sw}, \tag{8}$$

де  $t_{rise}$ ,  $t_{fall}$  - часи перемикання (часи наростання та спаду струму) на транзисторі. Час перемикання транзистора відповідає характеристиці повного заряду транзистора затвора, а також паразитної ємності на затворі і залежить від режиму роботи перетворювача.

Значення струму затвора при включенні та вимкненні транзистора визначається відповідно:

$$I_G(ON) = \frac{V_{GS} - \left( \frac{V_{PL} + V_{th}}{2} \right)}{R_G(ON)}, \tag{9}$$

$$I_G(OFF) = \frac{\frac{V_{PL} + V_{th}}{2}}{R_G(OFF)}$$

де  $V_{GS}$  - номінальна напруга на затворі транзистора,

$V_{PL}$  - напруга, при якому починає проявлятися ефект Міллера, при якому збільшується ємність затвора, внаслідок чого можливе помилкове відкриття транзистора,  $V_{th}$  - гранична напруга,  $R_G$  - опір затвора.

Отримаємо вираз комутаційних втрат транзистора:

$$P_{sw}(ON) = \frac{V_{DS} I_D R_G(ON) f_{sw}}{2} \cdot \left[ \frac{Q_{GD}}{V_{GS} - V_{PL}} + \frac{Q_{GS}}{V_{GS} - \left( \frac{V_{PL} + V_{th}}{2} \right)} \right], \tag{10}$$

$$P_{sw}(OFF) = \frac{V_{DS} I_D R_G(OFF) f_{sw}}{2} \cdot \left[ \frac{Q_{GD}}{V_{PL}} + \frac{Q_{GS}}{\left( \frac{V_{PL} + V_{th}}{2} \right)} \right]$$

є  $Q_{GS}$  – заряд затвор-витік,  $Q_{GD}$  – заряд затвор-стік.

В Табл. 1 представлені результати оцінки величин комутаційних втрат транзисторів на основі нітриду галію та кремнію окремих виробників згідно з виразами (10).

Таблиця 1

**Порівняння електричних характеристик польових транзисторів**

Транзистор	Електричні характеристики					$P_{sw}/f_{sw}$
	$V_{DS}, V$	$i_d, A$	$Q_G, nC$	$Q_{GS}, nC$	$Q_{GD}, nC$	
Si						
R6507ENJ	650	7	20	3	11	$1.78 \cdot 10^{-5}$
STFU9N65M2	650	5	10.3	2.4	4.8	$3.95 \cdot 10^{-6}$
GaN						
GS-065-004-1-L	650	4	0.8	0.3	0.3	$1.9 \cdot 10^{-7}$
GS66502B	650	7.5	1.5	0.55	0.44	$1.53 \cdot 10^{-6}$

Порівнюються транзистори на основі нітриду галію і два транзистори на основі кремнію зі схожими електричними характеристиками. Згідно з документацією більшості популярних моделей транзистори на основі нітриду галію мають більш низькі значення заряду  $Q_{GS}$  і  $Q_{GD}$ , тому сумарні комутаційні втрати будуть в десятки разів менше, ніж у польових транзистори на основі кремнію.

Враховуючи також менші втрати провідності, а також практично нульовий час відновлення у посиленних структурах GaN-транзисторів, можна зробити висновок, що сумарні втрати транзистора будуть меншими, ніж у кремнієвих польових транзисторів, дозволяє досягти більшої ефективності силових перетворювачів.

### Висновки

Порівняльний аналіз втрат на перемикання в GaN польових транзисторах із широкою забороненою зоною та традиційних кремнієвих пристроях підкреслює незаперечний потенціал GaN у розвитку силової електроніки. Перспективні тенденції в сукупності підтверджують, що пристрої GaN пропонують значні переваги у поліпшенні енергоефективності при зниженні втрат при комутації. Оскільки галузь продовжує розвиватися, ці висновки підкреслюють важливу роль GaN у створенні більш ефективних і високопродуктивних рішень силової електроніки.

### Література

1. An Accurate Analytical Model of SiC MOSFETs for Switching Speed and Switching Loss Calculation in High-Voltage Pulsed Power Supplies [Електронний ресурс] / Zaojun Ma [та ін.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2022. – С. 1–17. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/tpel.2022.3219241> (дата звернення: 12.10.2023). – Назва з екрана.
2. Analytical Estimation of Power Losses in a Dual Active Bridge Converter Controlled with a Single-Phase Shift Switching Scheme [Електронний ресурс] / Marek Turzyński [та ін.] // Energies. – 2022. – Т. 15, № 21. – С. 8262. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en15218262> (дата звернення: 12.10.2023).
3. Multi-level Synthesis Gate Voltage Active Control Technology for Optimizing IGBT Switching Characteristics [Електронний ресурс] / Xianjin Huang [та ін.] // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2022. – С. 1. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2022.3216277> (дата звернення: 12.10.2023). – Назва з екрана.
4. Comparison and evaluation of the thermal performance between SiC-MOSFET and Si-IGBT [Електронний ресурс] / Cheng Tang [та ін.] // 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Haining, China, 28–31 жовт. 2022 р. – [Б. м.], 2022. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1109/itecasia-pacific56316.2022.9941944> (дата звернення: 12.10.2023). – Назва з екрана.
5. Gallium Nitride Processing for Electronics, Sensors and Spintronics [Електронний ресурс]. – London : Springer-Verlag, 2006. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/1-84628-359-0> (дата звернення: 12.10.2023). – Назва з екрана.
6. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices [Електронний ресурс] / B. Jayant Baliga. – Cham : Springer International Publishing, 2019. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93988-9> (дата звернення: 12.10.2023). – Назва з екрана.
7. Kazimierczuk M. K. Pulse-width modulated DC-DC power converters / Marian K. Kazimierczuk. – Chichester, West Sussex, United Kingdom : John Wiley & Sons Inc., 2015.
8. Basso C. P. Switch-Mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs / Christophe P. Basso. – [Б. м.] : McGraw-Hill Education, 2014. – 992 с.

### References

1. An Accurate Analytical Model of SiC MOSFETs for Switching Speed and Switching Loss Calculation in High-Voltage Pulsed Power Supplies [Electronic resource] / Zaojun Ma [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2022. – P. 1–17. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/tpel.2022.3219241> (date of access: 12.10.2023). – Title from screen.
2. Analytical Estimation of Power Losses in a Dual Active Bridge Converter Controlled with a Single-Phase Shift Switching Scheme [Electronic resource] / Marek Turzyński [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15, no. 21. – P. 8262. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/en15218262> (date of access: 12.10.2023).
3. Multi-level Synthesis Gate Voltage Active Control Technology for Optimizing IGBT Switching Characteristics [Electronic resource] / Xianjin Huang [et al.] // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2022. – P. 1. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2022.3216277> (date of access: 12.10.2023). – Title from screen.
4. Comparison and evaluation of the thermal performance between SiC-MOSFET and Si-IGBT [Electronic resource] / Cheng Tang [et al.] // 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Haining, China, 28–31 October 2022. – [S. l.], 2022. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/itecasia-pacific56316.2022.9941944> (date of access: 12.10.2023). – Title from screen.
5. Gallium Nitride Processing for Electronics, Sensors and Spintronics [Electronic resource]. – London : Springer-Verlag, 2006. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/1-84628-359-0> (date of access: 12.10.2023). – Title from screen.
6. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices [Electronic resource] / B. Jayant Baliga. – Cham : Springer International Publishing, 2019. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93988-9> (date of access: 12.10.2023). – Title from screen.
7. Kazimierczuk M. K. Pulse-width modulated DC-DC power converters / Marian K. Kazimierczuk. – Chichester, West Sussex, United Kingdom : John Wiley & Sons Inc., 2015.
8. Basso C. P. Switch-Mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs / Christophe P. Basso. – [S. l.] : McGraw-Hill Education, 2014. – 992 p.