

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ В ІМПУЛЬСНОМУ БАР'ЄРНОМУ РОЗРЯДІ

І.В. Божко*, канд.техн.наук, І.П. Кондратенко**, член-кор. НАН України

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: ws77@ukr.net; dep7ied@ukr.net

На основі експериментальних досліджень імпульсного бар'єрного розряду показано, що за рахунок підключення паралельно розрядній камері магнітного ключа, осердя якого відразу після проходження цього розряду насичується, можна досягнути ефективного розрядження діелектричного бар'єра розрядної камери. Завдяки цьому було отримано ~30% підвищення коефіцієнта корисного використання енергії, яка була передана в розрядну камеру від джерела живлення. Означено шлях до розробки таких магнітних ключів. Показано, що застосування узгодженого з електричною схемою магнітного ключа дає змогу коректно визначати концентрацію електронів та їхню середню енергію в газовій частині міжелектродного проміжку під час розряду. Бібл. 7, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: імпульсний бар'єрний розряд, енергія імпульсу, діелектричний бар'єр, магнітний ключ.

Бар'єрний розряд (БР) має широке застосування: при генерації озону, модифікації поверхні твердих матеріалів, у медичних цілях тощо [5]. Існують два основні способи створення БР: змінною (синусоїдальною) та імпульсною напругами. Коли крутизна імпульсу напруги, що збуджує імпульсний бар'єрний розряд (ІБР), стає досить великою ($\sim 2 \cdot 10^{11}$ В/с), такий розряд має значно вищу ($\sim 30\%$) енергетичну ефективність ніж БР змінного струму [3,5], у зв'язку з цим цей вид розряду почав широко використовуватися на практиці. У випадку ІБР необхідно вирішувати дві основні науково-технічні задачі. Перша з них – це створення генератора коротких (~ 100 нс) високовольтних (понад ~ 10 кВ) імпульсів напруги з великим енергоресурсом роботи (>1000 год). В Інституті електродинаміки НАН України ця задача була вирішена завдяки використанню в генераторі імпульсів (ГІ) принципів магнітного стискання імпульсів та застосування в кінцевій ланці ГІ індуктивного накопичувача енергії, що комутується діодами з малим часом обривання (~ 40 нс) зворотного струму [1]. Друга задача полягає в тому, що, як правило, ІБР генерується уніполярним імпульсом напруги, внаслідок чого після закінчення розряду на діелектричному бар'єрі залишається заряд, який сприяє зменшенню передачі енергії від генератора до розрядної камери (РК). Ємнісна енергія бар'єра, що обумовлена цим залишковим зарядом, може складати суттєву частку (30–40%) енергії, що отримала РК від ГІ. У подальшому в паузі між імпульсами ІБР ця енергія непродуктивно розсіюється на бар'єрі, в газовому проміжку РК та елементах ГІ. Зараз для розрядження бар'єра в основному використовуються два засоби: керовані газорозрядні елементи та відповідні схеми з твердотільними електронними ключами [3,7]. Перший з них має обмежений енергоресурс роботи, другий є проблемним, бо нема надійних пристроїв на високі напруги з малим часом комутації (~ 100 нс). Для розрядження бар'єрної ємності пропонується використовувати простий та надійний спосіб – магнітний ключ (МК), осердя якого насичується в момент закінчення ІБР.

Мета роботи – показати, що шунтування РК магнітним ключем є способом підвищення ефективності використання енергії в ІБР. Для вирішення цієї задачі була створена експериментальна установка (рис. 1), до якої входили генератор імпульсів ГІ [1], розрядна камера коаксіального типу РК, електрична схема заміщення якої представлена ємностями бар'єра C_6 та газового проміжку C_2 і опором газового проміжку R_2 , датчиками напруги ДН та струму ДС, а також магнітним ключем МК, що підключався паралельно РК.

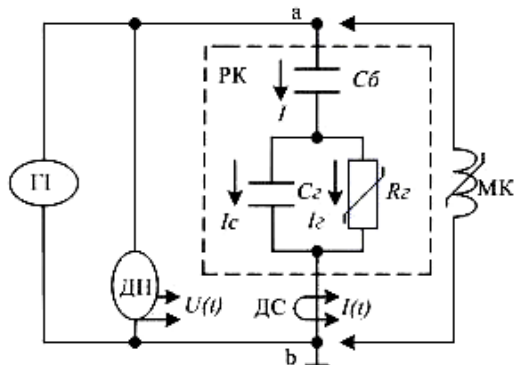


Рис. 1

Під час паузи між імпульсами ІБР ємність C_6 крім відносно повільного саморозряду може також розряджатися через R_2 на вихідний опір генератора імпульсів $R_{ГІ}$. Але для ефективного розряду діелектричного бар'єра треба створити певні умови. Вони мають бути такі, щоб час розряду τ_6 бар'єрної ємності, який $\sim C_6 (R_2 + R_{ГІ})$, після ІБР не перевищував кількох сотень наносекунд, бо інакше газ встигне суттєво деіонізуватися і його опір R_2 стане неприпустимо великим (під час розряду $R_2 \sim 10$ Ом). Опір $R_{ГІ}$ відразу після закінчення первинного ІБР також має бути якнайменшим, щоб не збільшувати величину τ_6 та непродуктивні витрати енергії при вторинному розряді. Для умов цієї роботи $R_{ГІ} \approx 70$ Ом. Включення МК після первинного ІБР має суттєво зменшувати $R_{ГІ}$. Переваги застосування МК у тому,

що він є надійним пристроєм з практично необмеженим енергоресурсом, в якому витрачається відносно мала частка енергії, що була накопичена в бар'єрній ємності.

Розрахунки параметрів МК проводилися на основі формули [2]

$$\int_0^{\tau} U(t)dt = NS\Delta B, \quad (1)$$

де $U(t)$ – зміна в часі t напруги U на МК, τ – час до включення МК від початку імпульсу напруги, N, S – число витків на осерді МК та площа його перерізу відповідно, ΔB – перепад магнітної індукції в осерді МК під час дії імпульсу. Час включення МК можна було регулювати завдяки зміні струму в обмотці підмагнічування I_n , внаслідок чого змінювалася величина ΔB .

Осцилограми струму $I(t)$ (1) та напруги $U(t)$ (2) на РК при відсутності та наявності МК показані відповідно на рис. 2 та 3. З кривої $I(t)$ на рис. 2 видно, що імпульс струму складається з двох частин: прямого струму з амплітудою $I_{m1}=400$ А тривалістю $\tau_1 \approx 120$ нс та зворотного з амплітудою $I_{m2}=110$ А тривалістю $\tau_2 \approx 140$ нс. Після закінчення ІБР на РК залишаються напруга 5 кВ (крива 2) та заряд на бар'єрі $\Delta q = 13$ мкКл (крива 3), який

обчислювався за виразом
$$\Delta q = \int_0^t I(t)dt. \quad (2)$$

На рис. 4, 5 за відсутності та наявності МК показані відповідно відображені зміни у часі енергії $W_{ГІ}$ (крива 1), що була отримана РК від ГІ, та енергії W_2 , яка утилізується в газовому проміжку РК (крива 2). Значення $W_{ГІ}$ знаходилися за виразом

$$W_{ГІ} = \int_0^{\tau_1} I(t)U(t)dt, \quad (3)$$

а W_2 – за методикою, викладеною у [6]. З рисунків видно, що енергія W_2 передається двома порціями: під час проходження прямого та зворотного струмів ІБР. У цілому при відключеному МК після закінчення ІБР величина W_2 значно менша величини $W_{ГІ}$. Коефіцієнт передачі енергії від ГІ у газовий проміжок РК $\eta = W_2/W_{ГІ}$ складає 0,67.

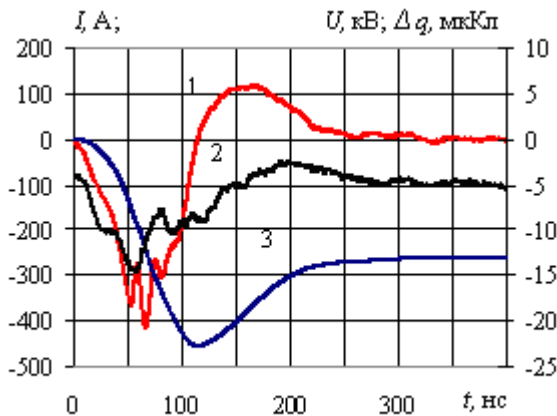


Рис. 2

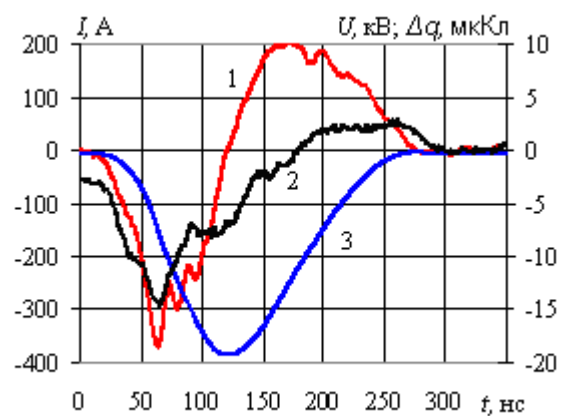


Рис. 3

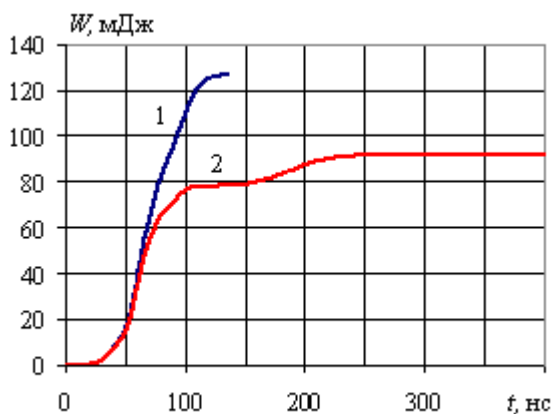


Рис. 4

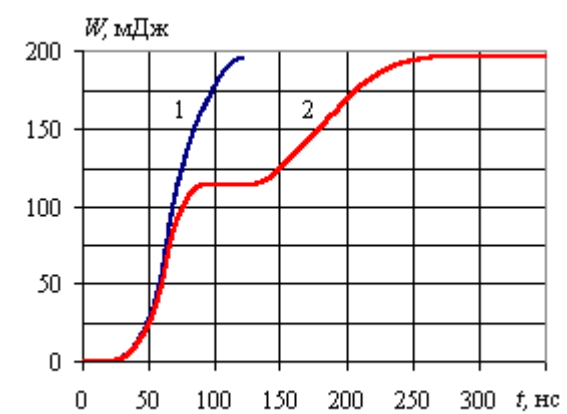


Рис. 5

Підключення МК ($I_n = 0,3$ А) мало впливає на параметри прямого розряду, але для зворотного розряду вони суттєві: майже вдвічі зростає вторинний струм ($I_{m2}=200$ А), рис. 3, крива 1, а після закінчення ІБР $U=0$, $\Delta q=0$ (криві 2, 3 відповідно). Це вказує на те, що діелектричний бар'єр повністю розряджений. Завдяки наявності МК майже вся енергія $W_{ГІ}$, що була отримана РК від ГІ, виділяється в газовому проміжку РК ($\eta = 0,98$). Це видно з рис. 5, на якому показано зміни у часі енергії $W_{ГІ}$ (крива 1) та енергії W_z , котра утилізується в газовому проміжку РК (крива 2).

Для отримання максимального коефіцієнта передачі енергії η потрібно узгодження параметрів МК з параметрами ГІ та РК. Його згідно з (1) можна проводити за рахунок вибору числа витків N , площі перерізу магнітопроводу S та перепаду магнітної індукції в ньому ΔB . У цій роботі попередній вибір параметрів МК проводився на основі рівняння (1). При цьому час τ вибирався таким, щоб МК включався відразу після прямого імпульсу ІБР, тобто щоб $\tau=\tau_1 \approx 120$ нс. Остаточне узгодження велося шляхом регулювання величини ΔB за рахунок зміни струму підмагнічування I_n . Аналіз осцилограм струмів через РК та МК і напруги на них показав, що при $I_n < 0,3$ А відбувається передчасне включення МК ($\tau < 120$ нс), а при $I_n > 0,3$ А – запізніле ($\tau > 120$ нс). Визначено, що струм $I_n = 0,3$ А є оптимальним. З наведеної таблиці видно, що при оптимальному значенні I_n величини η , $W_{ГІ}$ – найбільші. Ці результати вказують на те, що МК повинен спрацювати одночасно з завершенням прямого струму ІБР, а керування параметрами МК за допомогою струму підмагнічування в допоміжній обмотці на ньому є чутливим і простим засобом. Для порівняння в таблиці також показані значення параметрів ІБР при відсутності МК. З неї видно, що величини η , $W_{ГІ}$ суттєво менші тих, що відповідають випадку наявності узгодженого МК.

МК	I_n , А	Δq , мКл	W_z , мДж	η
–	–	-13,1	161	0,67
+	0,5	-7,2	176	0,73
+	0,4	-3,3	196	0,83
+	0,3	-0,17	200	0,98

Слід відзначити ще один позитивний наслідок застосування МК. Оскільки при його підключенні до електричної схеми перед початком кожного імпульсу БР залишковий заряд відомий ($\Delta q = 0$), то можна коректно визначати основні параметри плазми в газовому проміжку РК під час розряду: концентрацію електронів N_e та їхню середню енергію T_e . Для цього спочатку на основі осцилограм $U(t)$ і $I(t)$ та параметрів РК (C_δ і C_z) за методикою [6] обчислюються напруга $U_z(t)$ на газовій частині РК та струм провідності $I_z(t)$ через нього. Після цього розраховуються усереднене за довжиною $\delta_z=0,24$ см газового проміжку РК значення електричного поля в ньому $E_z = U_z/\delta_z$ та параметри плазми N_e і T_e . Так, для моменту часу, коли $I(t)$ досягає максимуму $I_{m1}=380$ А, напруга $U(t)=14$ кВ (рис. 3), величини $U_z=11$ кВ, $I_z=380$ А, а електричне поле $E_z=46$ кВ/см. Для цих умов густина струму сягає $j = I_z/S_e = 1,42$ А/см² ($S_e=267$ см² – площа електродів РК). З виразу

$$j = e\mu_e N_e E_z \quad (4)$$

де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $\mu_e = 380$ см²/(В·с) [4] – заряд та рухливість електронів відповідно, можна знайти, що $N_e = 5,23 \cdot 10^{11}$ см⁻³, а з рівняння Ейнштейна

$$kT_e / e = D_e / \mu_e \quad (5)$$

де k – постійна Больцмана, D_e – коефіцієнт дифузії електронів поперек електричного поля, енергія електронів $T_e \approx 3,3$ еВ [4]. З цих розрахунків видно, що під час первинного ІБР у газовому проміжку РК існує майже двократне перенапруження по відношенню до того, що потрібно для його пробію (≈ 27 кВ/см) при густині струму та об'ємній питомій енергії $W_o = W_z/V = 3,1$ мДж/см³ ($V=58$ см³ – об'єм газового проміжку РК), що на півтора-два порядки більші, ніж ті, що характерні для БР змінного струму [3,5]. Концентрація електронів N_e та їхня енергія T_e приблизно ті ж самі, що і у стримері БР змінного струму [3,5].

Висновки.

Ефективним засобом для розрядження бар'єра та корисного використання накопиченої в ньому під час розряду енергії може бути нелінійна індуктивність, що підключена паралельно розрядній камері, феромагнітне осердя якої насичується відразу після проходження прямого імпульсу бар'єрного розряду. При параметрах цієї індуктивності, які узгоджені з параметрами генератора імпульсів та розрядної камери, до 98% всієї енергії, що надходить до розрядної камери, може корисно утилізуватися в її газовому проміжку. Включення такої узгодженої індуктивності до електричної схеми відкриває шлях до коректного визначення основних параметрів плазми в газовому проміжку розрядної камери: концентрації електронів та їхньої енергії.

1. Божко І.В., Зозулев В.І., Кобильчак В.В. SOS-генератор для електророзрядних технологій на основі імпульсного бар'єрного розряду. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 2. С. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.02.063>
2. Месерович Л.А., Ватин І.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. М.: Советское радио, 1968. 476 с.
3. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. Москва: МГУ, 1989. 175 с.
4. Физические величины. Справочник под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 431 с.
5. Alexander Fridman. Plasma Chemistry. Philadelphia: Drexel University, 2008. 1022 p.
6. Bozhko I.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue 12. Pp. 3064–3069.

7. Mericam-Bourdet N., Kirkpatrick M.J., Tuvache F., Frochot D., Odic E. Effect of voltage waveform on dielectric barrier discharge ozone production efficiency. *European Physics Journal: Applied Physics*. 2012. No 57. 30801(p1 – p10).

УДК 537.523.9

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСНОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

И.В. Божко, канд.техн.наук, **И.П. Кондратенко**, член-корр. НАН Украины
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.
E-mail: ws77@ukr.net; dep7ied@ukr.net

На основании экспериментальных исследований импульсного барьерного разряда показано, что за счет подключения параллельно разрядной камере магнитного ключа, сердечник которого насыщается сразу же после окончания тока прямого разряда, можно эффективно (~99%) использовать накопленную в диэлектрическом барьере энергию во время обратного разряда. В результате этого было получено ~30% повышения коэффициента использования энергии, которая поступила от генератора импульсов в разрядную камеру. Обозначен путь к разработке таких магнитных ключей. Показано, что использование согласованного с электрической схемой магнитного ключа позволяет корректно определять концентрацию электронов и их среднюю энергию в газовой части межэлектродного промежутка во время разряда. Библиограф. 7, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: импульсный барьерный разряд, энергия импульса, диэлектрический барьер, магнитный ключ.

A WAY TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF PULSE DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

I.V. Bozhko, I.P. Kondratenko
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.
E-mail: ws77@ukr.net; dep7ied@ukr.net

The researches of unipolar pulse dielectric barrier discharge in a coaxial chamber are executed. It is shown that the capacitive energy that remains on dielectric barrier after graduation forward discharge can effectively (~99%) be used in reverse discharge to connect parallel discharge camera a magnetic switch. A magnetic switch is made in such a way that its core saturates immediately following after graduation discharge. The main requirements, when a magnetic switch is designing, are specified. It is shown that the use of harmonized with electrical circuit a magnetic switch allows you to correctly identify density of electrons and their average energy in the gas part of the interelectrode gap during discharge. References 7, table 1, figures 4.

Keywords: pulse dielectric barrier discharge, energy of a pulsed, dielectric barrier, magnetic switch.

1. Bozhko I.V., Zozuljov V.I., Kobylchak V.V. SOS-generator for the electric discharge technology used pulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 2. Pp. 63–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.02.063> (Ukr)
2. Meerovich L.A., Vatin I.M., Zaitsev E.V., Kandykin V.M. Magnetic generators of pulses. Moskva: Sovetskoe radio, 1968. 476 p. (Rus)
3. Samoylovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V. Physical chemistry of barrier discharge. Moskva: Moskovskii gosudarstvennyi universitet, 1989. (Rus)
4. Physical quantities. Handbook by editor Grigorieva I.S., Meilikhova E.Z. Moskva: Energoatomizdat, 1991. 431 p. (Rus)
5. Alexander Fridman. Plasma Chemistry. Philadelphia: Drexel University, 2008. 1022 p.
6. Bozhko. I.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue 12. Pp. 3064–3069.
7. Mericam-Bourdet N., Kirkpatrick M.J., Tuvache F., Frochot D., Odic E. Effect of voltage waveform on dielectric barrier discharge ozone production efficiency. *European Physics Journal: Applied Physics*. 2012. No 57. 30801(p1 – p10).

Надійшла 05.03.2018
Остаточний варіант 28.03.2018