

**ВЗАЄМОУЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ТА РОБОЧОЇ КАМЕРИ
ДЛЯ ОБРОБКИ ВОДИ ІМПУЛЬСНИМ БАР'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ**

В.О. Берека *, **І.В. Божко** **, канд. техн. наук, **О.М. Карлов** ***, канд. техн. наук,
І.П. Кондратенко ****, чл.-кор. НАН України
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: ws77@ukr.net

Задля визначення взаємоузгоджених параметрів вихідної ланки генератора коротких (~100 нс) імпульсів з робочою камерою, в якій імпульсним бар'єрним розрядом відбувається обробка води в крапельно-плівковому стані, розроблено наближену математичну модель, що описує перехідні процеси в схемі. Прийнятна для практики точність моделі підтверджена експериментальними даними. Розраховано параметри ємності діелектричного бар'єру та магнітних ключів, за яких ефективність передачі енергії в робочу камеру перевищує 60%. Встановлено, що ефективність у визначальній мірі залежить від відношення ємності діелектричного бар'єру робочої камери до вихідної ємності генератора імпульсів, оптимальне значення якого становить ≈2,6. Обґрунтовано вибір величини індуктивності розсіювання магнітного ключа, через який йде розрядження бар'єрної ємності після закінчення прямого імпульсу струму. Встановлено, що узгодженість параметрів вихідної ланки генератора імпульсів та робочої камери дає можливість суттєво зменшити теплове навантаження на швидкодіючий розмикаючий діод в вихідній ланці генератора імпульсів. Бібл. 15, рис. 8.

Ключові слова: імпульсний бар'єрний розряд, обробка води, ефективність передачі енергії.

Вступ. Бар'єрний розряд змінного струму (БР) має давню історію та поширене використання на практиці [1]. Він застосовується для генерації озону, обробки води, поверхні твердих тіл, очищення газів тощо [1–3]. Імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) є відносно новим напрямом в області електрофізики газового розряду [4, 5] і за останні десятиріччя сфокусував на собі значну увагу [6–10]. Інтерес до ІБР зумовлений тим, що зі зростанням швидкості підйому напруги du/dt на розрядній камері (РК) понад ~0,01 кВ/нс починає збільшуватися його енергоефективність. Наприклад, для ІБР за du/dt ~0,3 кВ/нс енергоефективність генерації ІБР озону зростає вдвічі [4, 5] у порівнянні з БР. Дослідження обробки води також показали, що енергоефективність імпульсних бар'єрних розрядів на поверхню води набагато вище, ніж за інших видів електричних розрядів [6–9]. Зазвичай енергоефективність того чи іншого типу розряду прийнято оцінювати величиною його енергетичного виходу Y [6–9], котрий є питомим параметром, який дорівнює масі розкладеного забруднювача в грамах, що припадає на 1 кВт·год витраченої в РК енергії. Під час обробки ІБР води, що містить домішки органічної речовини (метилена синь), котра важко піддається обробці другими методами, авторами було досягнуто величин Y , які значно (десятки відсотків) перевищують ті, що характеризують інші види розрядів [10].

Однак широке практичне впровадження електророзрядних методів обробки води в значній мірі стримується високими питомими енерговитратами, що пов'язані з ними. Вони визначаються не тільки видом розряду, а й втратами енергії через її передачу від електричної мережі до робочої камери. Тому для практичного впровадження ІБР окрім вибору виду розряду важливими є також параметри генератора коротких імпульсів та узгодженість сумісного функціонування генератора та робочої камери, де відбувається обробка води.

Наносекундні генератори імпульсів (ГІ) з великими ресурсом роботи та частотою повторення імпульсів будуються на основі індуктивних накопичувачів енергії з швидкодіючими перемикачами на розмикання та ємнісних накопичувачів з швидкодіючими перемикачами на замикання. ГІ з

© Берека В.О., Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., 2023
ORCID ID: * <https://orcid.org/0000-0003-0888-2864>; ** <https://orcid.org/0000-0002-7955-246X>;
*** <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>; **** <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>

індуктивними накопичувачами залишаються до цього часу громіздкими та дорогими і більш підходять для генерації імпульсів з напругою ~ 100 кВ та вище. Економічним рішенням для створення імпульсів тривалістю близько 100 нс середньої напруги (кілька десятків кВ) є використання ГІ з магнітною компресією імпульсів [11]. Недоліком більшості таких ГІ є багатоступеневе стиснення імпульсів, яке потребує при цьому наявності шляхів для перемагнічування осердь магнітних ключів. Використання комбінації ємнісного та індуктивного накопичувачів енергії дає змогу формувати фронти імпульсів з крутизою $du/dt \sim 1$ кВ/нс за малої кількості (2–3) ступенів магнітного стискання [11]. Це зменшує втрати енергії в ГІ та мінімізує об'єм накопичувальних конденсаторів, пропорційний числу ступенів стиснення.

Ефективна передача електричної енергії в робочу камеру від ГІ є однією з основних задач під час проектування комплексу для обробки води ІБР [11–13]. Формування та передача імпульсів між ланками в генераторах з магнітною компресією добре вивчені [14]. Труднощі виникають тоді, коли навантаженням вихідної ланки генератора стає газовий електричний розряд, вольтамперна характеристика якого залежить від багатьох факторів: тиску та температури газу, форми електродів, властивості діелектричного бар'єру, передіонізації тощо [5, 11–13]. В дослідженні та оптимізації загальних характеристик електророзрядного пристрою добре допомагає моделювання розряду в поєднанні з ГІ. Є кілька підходів до моделювання розряду. Найбільш коректні результати можна отримати, якщо зміну в часі опору робочої камери обчислювати шляхом рішення диференціальних рівнянь руху заряджених елементарних частинок, що утворюються внаслідок кількох десятків плазмохімічних реакцій, які відбуваються в газовому розряді [5]. Також під час розрахунків використовуються моделі руху не окремих заряджених частинок, а їхні ансамблі в дифузно-дрейфовому наближенні [15] тощо. Але ці шляхи дуже складні та більш підходять у разі електрофізичних досліджень розрядів. Для практичних розробок під час моделювання як робочої камери, так і інших нелінійних елементів електричного кола, використовуються, як правило, апроксимаційні рівняння [11, 12]. Ці рівняння виводяться на основі експериментальних та розрахункових даних. Роботу ГІ з навантаженням у вигляді коронного розряду розглянуто в роботах [11, 12]. В них під час розрахунків в еквівалентній електричній схемі розряд представлявся як нелінійний опір, вольтамперна характеристика якого моделювалася на підставі експериментальних даних. Але у випадку ІБР наявність в розрядному колі ємності діелектричного бар'єру ускладнює задачу та потребує змін в моделі.

Під час розробки електророзрядного комплексу для обробки води головними вихідними умовами є параметри розряду та продуктивність комплексу, котрі визначають характеристики робочої камери та генератора імпульсів. Враховуючи це, проектування передбачає *взаємне узгодження* параметрів цих частин комплексу таким чином, щоб коефіцієнт передачі енергії від зовнішньої мережі до робочої камери був якомога більшим. Виходячи з усього вищесказаного, *метою роботи* є розробка на основі експериментальних даних математичної моделі, що адекватно описує сумісну роботу вихідної ланки генератора імпульсів з підключеною до неї розрядною камерою, в якій відбувається обробка води імпульсним бар'єрним розрядом, та визначення на її основі оптимальних взаємоузгоджених параметрів вихідної ланки та розрядної камери.

Моделювання роботи вихідної ланки ГІ, що має навантаженням РК з ІБР. Під час розробки моделі були використані параметри ГІ та РК, що й в роботі [10]. Камера, в якій проходила обробка води ІБР, була коаксіального типу з газовим проміжком, величина якого $\delta = 3,2$ мм. Вода в ньому рухається у вигляді крапель з характерним діаметром 1 мм та плівок по його стінкам товщиною $\sim 0,1$ мм. Ємність діелектричного бар'єру (з відносною діелектричною проникністю $\epsilon \approx 4$) $C_0 = 360$ пФ. Ємність міжелектродного газового проміжку в РК, що розрахована згідно його геометричних розмірів, становить 50 пФ. Однак присутність в ньому крапель води приводить до її зростання до величини $C_r \approx 120$ пФ.

Генератор імпульсів побудований за принципом їхнього магнітного стискання з використанням в його вихідній ланці швидкодіючого переривника струму на основі двох паралельних ланок з послідовно включеними в кожній 30 діодами, що мають малий час відновлення зворотного опору (~ 40 нс). Схема високовольтної частина ГІ (рис. 1) функціонує наступним чином. Коли висока напруга на конденсаторі C_0 , який заряджається від імпульсного трансформатора (на схемі не показаний), досягає певного рівня, спрацьовує магнітний ключ (МК) L_0 . Після цього через діод VD заряджається конденсатор з ємністю C_1 , яка дорівнює C_0 . Коли C_1 повністю зарядився, включається МК1 (індуктивність L_1) і він через цей ключ та діод VD починає розряджатися до моменту часу $t \sim 20$ нс, після

якого струм через діод стрімко зменшується завдяки відновленню його зворотного опору. В цей момент напруга на L_1 змінює свій знак, після чого сумарна напруга від C_1 та L_1 прикладається до РК, схему заміщення якої на рис. 1 показано емностями діелектричного бар'єру C_6 і газового проміжку C_7 , опір якого R має нелінійний характер. Після проходження розрядного імпульсу струму через РК емність C_6 залишається зарядженою. Для її розрядження, щоб підготувати РК до наступного імпульсу, використовується МК2 (індуктивність L_2), який включається в певний час τ після подачі на РК імпульсу (В [10] $\tau \approx 80$ нс). За цей час осердя L_2 стає насиченим, її індуктивність різко зменшується і шунтує РК. Завдяки цьому розряджається бар'єрна емність, а частина накопиченої в ній енергії утилізується в газовому проміжку.

Аналіз сумісної роботи ГІ з РК на основі даних [10–13] показав, що у визначальній мірі на ефективність передачі енергії від електричної мережі в розрядну камеру впливає узгодженість параметрів камери та вихідної ланки генератора, до якої відносяться частина схеми на рис. 1 (без включення до неї C_0 та L_0). Тому саме цю частину електричної схеми вибрано для моделювання. Послідовність погодження попередніх ланок генератора з магнітним стисканням імпульсів детально описано в монографії [14] і в цій роботі не розглядається. Моделювання спільної роботи вихідної ланки джерела живлення і розрядної камери виконано в програмному продукті Micro-cap 12 у режимі розрахунку перехідних процесів. Нелінійні елементи задавалися кусочним методом в залежності від часу за допомогою функції Хевісайда, функції знаку або умовного оператора «якщо». Моделювання проходило для інтервалу часу 0 – 400 нс з кроком 0,01 нс. Параметри схеми заміщення і апроксимаційні формули для нелінійних елементів були визначені на основі аналізу експериментальних осцилограм напруг і струмів в елементах комплексу [17].

Під час моделювання використовувалася схема заміщення, яку наведено на рис. 2. В ній зміна в часі t індуктивності МК1 представлена індуктивностями намагнічування $L_{11} = 3$ мкГн і насичення $L_{12} = 1$ мкГн та опором $R_4(t)$, що змінюється за законом

$$R_4(t) = \begin{cases} t \leq 20 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 10^3 \cdot (1 - 5 \cdot 10^{-7} \cdot t) + 0,001 \text{ Ом} \\ t \geq 20 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 0,001 \text{ Ом.} \end{cases} \quad (1)$$

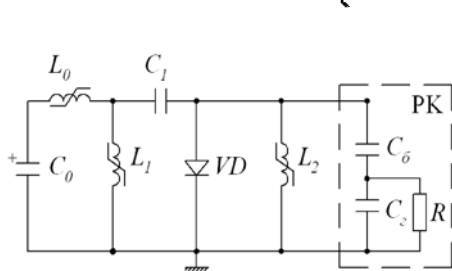


Рис. 1

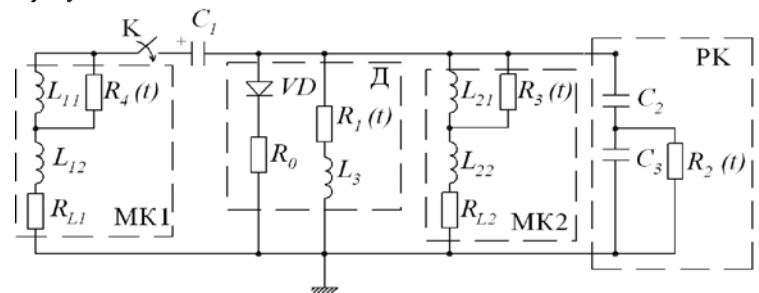


Рис. 2

Таким же чином моделювалася зміна в часі індуктивності МК2. На рис. 2: $L_{21} = 2,5$ мГн, $L_{22} = 5$ мкГн, опір

$$R_3(t) = \begin{cases} t \leq \tau, 200 \cdot (1 - t/\tau) + 0,001 \text{ Ом} \\ t \geq \tau, 0,001 \text{ Ом,} \end{cases} \quad (2)$$

де τ – час включення МК2.

В розрахунковій схемі (рис. 2) послідовно з індуктивностями для врахування в них омичних втрат енергії включені опори R_{L1} та R_{L2} по 1 Ом. Діод VD (рис. 1) моделювався блоком D (рис. 2), в якому є дві паралельні ланки. В першу ланку входять VD – ідеальний діод, що має нескінченно великий опір для зворотного струму, та $R_0 = 2$ Ом – опір цього діоду для прямого струму. Друга ланка складається з індуктивності діода $L_3 = 0,6$ мкГн та опором $R_1(t)$, який в залежності від часу t після замикаання ключа K дорівнює

$$R_1(t) = \begin{cases} t \leq 20 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 10 + 0,65 \cdot 10^9 \cdot t \text{ Ом} \\ 20 \cdot 10^{-9} \leq t \leq 30 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 23 + 12,2 \cdot 10^9 (t - 20 \cdot 10^{-9}) \text{ Ом} \\ t \geq 30 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 145 + 60 \cdot 10^9 (t - 30 \cdot 10^{-9}) \text{ Ом.} \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 2 параметри РК, що використовувалася в [12]: $C_2 = C_6 = 360$ пФ, $C_3 = C_7 = 120$ пФ, а опір газового проміжку під час розряду симулюється виразом

$$R_2(t) = \begin{cases} t \leq 20 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 10^5 \text{ Ом} \\ 20 \cdot 10^{-9} \leq t \leq 25 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 10^5 \cdot \exp[-1,1043 \cdot 10^7 \cdot (t - 20 \cdot 10^{-9})] \text{ Ом} \\ 25 \cdot 10^{-9} \leq t \leq 35 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 400 \cdot \exp[-2,3026 \cdot 10^7 \cdot (t - 25 \cdot 10^{-9})] \text{ Ом} \\ t \geq 35 \cdot 10^{-9} \text{ с, } 40 \text{ Ом.} \end{cases} \quad (4)$$

Розрахунки проводилися за початкової напруги $U_{C1}=29$ кВ на конденсаторі $C_1=1,1$ нФ. Ці величини відповідали умовам експерименту [12], в якому були записані осцилограми струму $i_e(t)$ (рис. 3, крива 3) через РК та напруги $u_e(t)$ (крива 4) на ній. Імпульс струму складається з двох частин: прямого струму з амплітудою $I_{m1} \approx 240$ А тривалістю $\tau_1 \approx 70$ нс та зворотного з величинами $I_{m2} \approx 160$ А

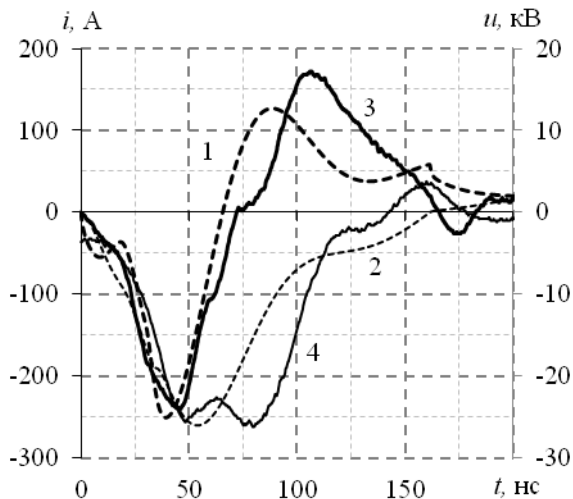


Рис. 3

і $\tau_2 \approx 100$ нс. Амплітуда напруги $u_e(t)$ під час прямого імпульсу струму досягає $U_{m1}=25,6$ кВ, а енергія, що виділяється в газовому проміжку за один імпульс, $W_e=93$ мДж [12]. Порівняння результатів моделювання осцилограм струму $i_1(t)$ (крива 1) та напруги на РК $u_1(t)$ (крива 2) показує їхній якісно однаковий з експериментальними характер. Розрахований струм $i_1(t)$, як і експериментальний $i_e(t)$, мають пряму та зворотну частини, причому їхні амплітудні значення та тривалості τ_1, τ_2 відрізняються лише на $\sim 4-10\%$. Також близькі між собою розрахована $u_1(t)$ та експериментальна $u_e(t)$ зміни в часі напруги на РК. Обчислена енергія імпульсу, що виділяється в газовому проміжку, $W_1 = 91,9$ мДж практично співпадає з експериментальним значенням W_e .

Щоб додатково перевірити достовірність розробленого алгоритму розрахунків, виконано аналогічні обчислення для іншої, суттєво відмінної за

своїми параметрами РК1 з меншою величиною газового проміжку ($\delta_6=0,7$ мм), на яку від ГП подавалися імпульси з амплітудою 13 кВ. Ці обчислення також показали подібне кількісне узгодження результатів моделювання з експериментальними даними. Оскільки моделювання дає задовільне для практичного використання узгодження розрахованих та експериментальних результатів за основними параметрами розряду (амплітуди струму і напруги та енергії імпульсу), її було використано для оцінки впливу елементів схеми на ефективність передачі енергії від вихідної ланки ГП до РК.

Визначення оптимальних взаємоузгоджених параметрів вихідної ланки генератора імпульсів та розрядної камери. Енергія, що виділяється в РК ($W_1 = 91,8$ мДж), становить лише 20 % від тієї енергії, що була накопичена в конденсаторі C_1 перед початком імпульсу ($W_{C1}=0,5C_1U^2_{C1}=462$ мДж). Задля визначення оптимальних параметрів електричної схеми, за яких коефіцієнт передачі енергії $\eta=100(W_1/W_{C1})$, % від вихідної ланки ГП до РК був би максимальним, спочатку були виконані розрахунки впливу на нього ємності діелектричного бар'єру C_2 . На практиці величину C_2 , яка пропорційна $\epsilon S_e/\delta_6$, можна змінювати за рахунок відносної діелектричної проникності ϵ матеріалу бар'єру, його товщини δ_6 та площі електродів S_e . Але можливості регулювання за рахунок проникності ϵ та товщини бар'єру δ_6 обмежені. Це пояснюється тим, що за $\epsilon > 10$ знижується здатність ІБР генерувати окислювачі [4], а нижня межа товщини бар'єру δ_6 визначається напругою його електричного пробоя. Тому найбільш придатним методом регулювання ємності C_2 є за рахунок площі електродів РК. Саме такі обчислення η у разі варіювання площі S_e проведено. При цьому враховувалося, що через зміну величини C_2 пропорційно змінюється ємність газового проміжку C_3 . Результати розрахунків у вигляді залежності $\eta(K_1)$, де $K_1=C_2/360=C_3/120$, ємності C_2, C_3 у відносних одиницях, показано на рис. 4 кривою 1. Розрахунки показали, що за $K_1 \approx 8$ (у разі збільшення площі електродів в вісім раз) ефективність передачі енергії в РК досягає максимуму $\eta=57\%$, тобто збільшується майже втричі. Таким чином, оптимальне співвідношення ємності діелектричного бар'єру робочої камери до вихідної ємності генератора імпульсів $k=8C_6/C_1 \approx 2,6$. Слід відзначити, що це значення суттєво відрізняється від тих, котрі є оптимальні під час передачі енергії в магнітних

генераторах імпульсів, що мають резистивне навантаження ($k=1$ [14]) чи нелінійне у вигляді коронного розряду ($k \approx 1,2$ [11]).

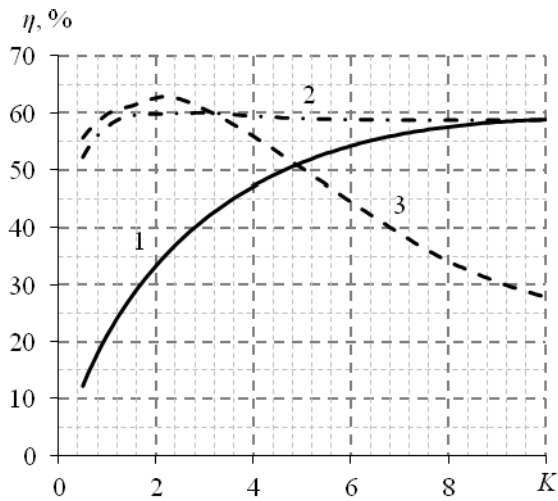


Рис. 4

На узгодженість ПІ та РК також впливають величини L_{22} і L_{12} . Це підтверджують залежності $\eta(K_2)$ та $\eta(K_3)$, які наведено на рис. 4 відповідно кривими 2 та 3. Перша з них віддзеркалює вплив індуктивності розсіювання магнітного ключа МК2. Величина K_2 показує кратність значень L_{22} по відношенню до 5 мкГн. Таким же чином K_3 є індуктивність розсіювання L_{12} у відносних одиницях (по відношенню до 1 мкГн). Залежність $\eta(K_2)$ розраховано за $K_1=8$, $K_3=1$, а $\eta(K_3)$ – за $K_1=8$, $K_2=3,5$. Криві $\eta(K_2)$ та $\eta(K_3)$ свідчать, що оптимальними значеннями є $K_2 \approx 3,5$ і $K_3 \approx 2$, за яких (та $K_1=8$) коефіцієнт η сягає 62%. Однак під час вибору величин K_2 , K_3 слід враховувати такі фактори. По-перше, оскільки в діапазоні змін $K_2=1-4$ коефіцієнт η практично один і той же, то з метою бажаного зменшення часу розряду бар'єрної ємності C_6 [13] доцільно вибирати менші значення індуктивності L_{22} , тобто $K_2=1$. По друге, зростання L_{12}

приводить до небажаного зменшення пропорційно $(L_{12})^{0,5}$ швидкості наростання напруги du/dt на фронті імпульсу. Тому, враховуючи що за $K_3=1$ – 3 індуктивність L_{12} мало впливає на величину η , оптимальним слід вважати $K_3=1$.

Взаємоузгодженість параметрів вихідної ланки ПІ та РК також створює кращі умови для збільшення ефективності розряду та функціонування елементів схеми. На рис. 5 показано осцилограми струмів i та напруг u на РК для першого (неузгодженого) i_1 , u_1 (відповідно криві 1, 2) та другого (узгодженого) i_2 , u_2 (відповідно криві 3, 4) варіантів. Як видно з рисунку, за узгодженої роботи амплітуда розрядного струму збільшується вдвічі. За рахунок цього, як показало обчислення, величина заряду, що переноситься струмом під час прямого імпульсу струму, зростає втричі. Цей результат є важливим тому, що при цьому збільшується кількість утворених активних частинок в розрядному проміжку, котра пропорційна цьому заряду.

Передача енергії в розрядний проміжок проходить під час прямої та зворотної частини імпульсу струму. На рис. 6 показано залежності енергій $w_1(t)$ та $w_2(t)$, що виділяються в розрядному проміжку в першому (крива 1) та другому (крива 2) варіантах. Доля енергії, що виділяється за прямого ($t \leq 65$ нс) та зворотного ($t \geq 65$ нс) імпульсах, в першому варіанті відповідно становить $\approx 60\%$ та 40% , в другому – 90% (при $t \leq 90$ нс) та 10% ($t \geq 90$ нс). Розподіл енергії в узгодженій схемі $w_2(t)$ кращий, бо в ньому менша доля непродуктивних витрат енергії в РК під час проходження через неї зворотного струму. Ці втрати мають тепловий характер, який обумовлений тим, що зворотний струм підтримується електричним полем в газовому проміжку, котре недостатньо сильне для ефективної

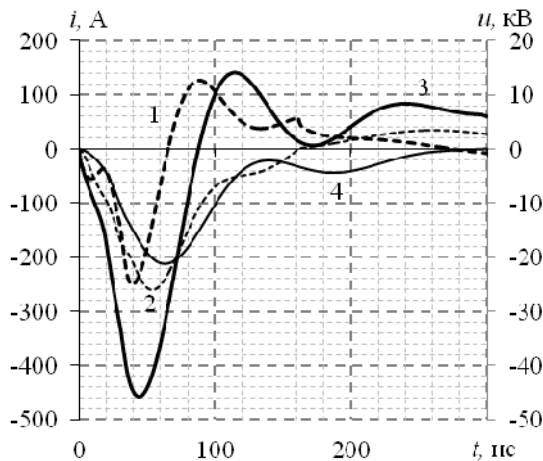


Рис. 5

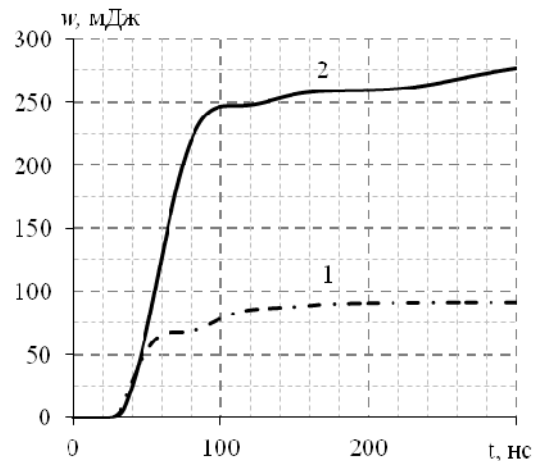


Рис. 6

генерації в ньому окиснювальних частинок. Окрім цього, як показало моделювання, у другому варіанті втрати енергії на активному опорі R_{L2} , індуктивності L_2 становлять лише 2 мДж, що в 7,5 разів менше, ніж в першому варіанті. Слід також сказати, що оскільки під час зворотного імпульсу струму магнітний ключ L_2 входить в розрядне коло, то для того, щоб втрати енергії в ньому, які пропорційні $(R_{L2})/R_2$, були несуттєвими, опір газового проміжку РК, котрий залежить від струму та величини газового проміжку в РК, повинен бути таким, щоб величина $(R_{L2})/R_2$ була незначною.

Основним призначенням магнітного ключа МК2, як уже відмічалось, є розрядження діелектричного бар'єру після закінчення прямого імпульсу струму. Тому оптимальним часом для включення цього ключа є момент τ , коли прямиий струм через РК зменшується до нуля. Для першого та другого варіантів розрахунків, як видно з рис. 5, цей момент відповідає ≈ 65 та ≈ 85 наносекундам. Саме в цьому діапазоні змін τ знаходяться (рис. 7) максимуми енергій $W_1(\tau)$ та $W_2(\tau)$, що виділяються в розрядному проміжку під час імпульсу, котрі обчислені відповідно для першого (крива 1) та другого (крива 2) варіантів.

Однією з серйозних проблем генераторів імпульсів з швидкодіючим переривником струму в його вихідній ланці є великі втрати енергії в ньому [11]. Узгодженість електричної схеми значно покращує умови роботи діода VD, бо різко зменшує на нього теплове навантаження. Це підтверджує моделювання струму i_d , що проходить через діод, та втрат в ньому енергії w_d під час імпульсу. Результати розрахунків на рис. 8 показують, що в узгодженій схемі амплітуда i_d (крива 2) вдвічі менша ніж в неузгодженій (крива 1), а втрати w_d – майже втричі (відповідно криві 4 та 3). Зменшення теплових втрат в діоді дає можливість розширити діапазони його допустимих навантажень по струму та частоті.

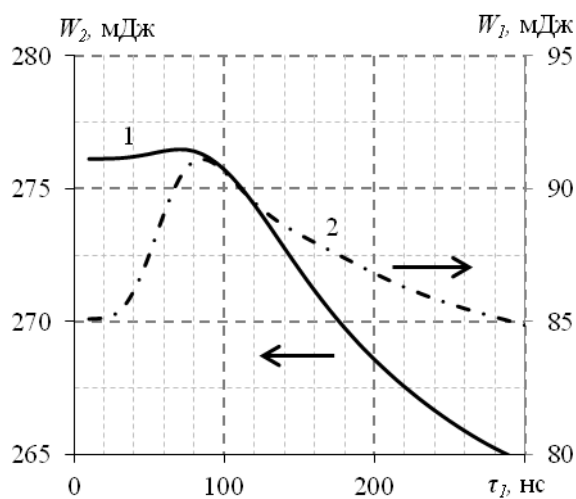


Рис. 7

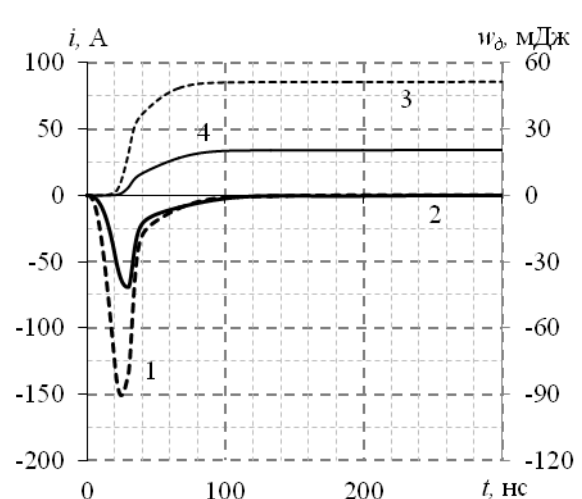


Рис. 8

Висновки.

1. Розроблено модель, що з прийнятною для практики точністю дає змогу проводити розрахунки перехідних процесів у вихідній ланці генератора імпульсів, яка має навантаженням робочу камеру, де імпульсним бар'єрним розрядом обробляється вода в крапельно-плівковому стані.

2. Узгодженість параметрів вихідної ланки генератора імпульсів та робочої камери в той же мірі, як і вид розряду, визначають енергоефективність всього електророзрядного комплексу для обробки води. За оптимальних параметрів схеми ефективність передачі енергії в робочу камеру, де проходить імпульсний бар'єрний розряд, досягає 62 %. В найбільшій мірі на ефективність передачі енергії впливає відношення ємності діелектричного бар'єру робочої камери до вихідної ємності генератора імпульсів. Оптимальним значенням цього відношення є величина $\approx 2,6$, яка в $\approx 2,5$ разів більша, ніж у випадку навантаження генератора активним лінійним чи нелінійним опором.

3. Узгодженість параметрів вихідної ланки генератора імпульсів та робочої камери дає можливість суттєво зменшити теплове навантаження на швидкодіючий переривник струму (діод) в вихідній ланці генератора.

Роботу виконано за рахунок держбюджетної теми «Розвиток теорії та моделювання нестационарних електрофізичних процесів в електропровідних і діелектричних середовищах імпульсних електромагнітних систем (шифр: Бар'єр-3)», що виконувалася за Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України, державний реєстраційний номер теми 0123U100671, КПКВК 6541030.

1. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma processing*. 2003. Vol. 23. No 1. Pp. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>.
2. Zike Qiu, Xiao Wei Yang, Chang Ming Du. The applications of plasma gas injection for pollutants treatment. *Transactions on Plasma Science*. 2022. Vol. 50. Issue 7. Pp. 1999–2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3177754>.
3. Божко І.В., Кондратенко І.П., Лобанов Л.М., Пашин М.О., Берднікова О.М., Миходуй О.Л., Кушнарєва О.С., Гончаров П.В. Застосування імпульсного бар'єрного розряду для обробки поверхні пластин зі сталі марки 25ХГНМТ. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 1. С. 76–80. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.076>.
4. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. 176 с.
5. Olof Nilsson J., Eninger Jan E. Numerical Modeling of Ozone Production in a Pulsed Homogeneous Discharge: A Parameter Study. *IEEE Transactions on plasma science*. 1997. Vol. 25. No 1. Pp. 73–82.
6. Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Fundamentals and Applications. Edited by Mihaela I. Stefan. IWA Publishing, 2018. 712 p. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781780407197>.
7. Vanraes P., Nikiforov A.Y., Leys C. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutants. *Plasma Science and Technology. Plasma Science and Technology – Progress in Physical States and Chemical Reactions*. 2016. Pp. 429–476. DOI: <https://doi.org/10.5772/61830>.
8. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Mingbo Wu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 236. Pp. 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>.
9. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Yield of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No 6. Pp. 1043–1050. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2691726>.
10. Берека В.О., Божко І.В., Кондратенко І.П. Дослідження енергоефективності обробки імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельно-плівковому стані. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 3. С. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.050>.
11. Pokryvalo A., Wolf M., Yankelevich Y. Investigation of Operational Regimes of a High-Power Pulsed Corona Source with an All-solid State Pulser. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2007. Vol. 14. No 4. Pp. 846–857. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.4286515>.
12. Uhm H.S. An Analytical Theory of Corona Discharge Plasma. *Physics of Plasmas*. 2000. Vol. 4. No 9. Pp. 3117–3128. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.872451>
13. 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: <http://orcid.org/0000-0002-7955-246X>.
14. Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. М.: Советское радио, 1968. 476 с.
15. Singh S., Serdyuk Y.V., Gubanski S.M. Simulations of electrical discharges in air using stabilized drift-diffusion model. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2018. Vol. 46. Issue 8. Pp. 3031–3039. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2850803>.

COORDINATION OF PARAMETERS OF THE POWER SOURCE AND THE WORKING CHAMBER FOR WATER TREATMENT WITH PULSE BARRIER DISCHARGE

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

To determine the mutually agreed parameters of the output link of the generator of short (~100 ns) pulses with a working chamber, in which water is treated in the droplet-film state by a pulsed barrier discharge, an approximate mathematical model was developed that describes the transient processes in the circuit. The reliability of the model is confirmed by experimental data. The optimal parameters of the capacitance of the dielectric barrier and magnetic keys were calculated, according to which the efficiency of energy transfer to the working chamber reaches 62%. It is shown that it largely depends on the ratio of the barrier capacity of the working chamber to the output capacity of the pulse generator, the optimal value of which is ≈2.6. The selection of the value of the dissipation inductance of the magnetic

key, through which the discharge of the barrier capacity occurs after the end of the direct current pulse, is justified. It was established that the consistency of the parameters of the output link of the pulse generator and the working chamber makes it possible to significantly reduce the thermal load on the fast-acting opening diode in the output link of the pulse generator. References 15, Figures 8.

Key words: impulse barrier discharge, water treatment, energy transfer efficiency.

1. Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma processing*. 2003. Vol. 23. No 1. Pp. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>.
2. Zike Qiu, Xiao Wei Yang, Chang Ming Du. The applications of plasma gas injection for pollutants treatment. *Transactions on Plasma Science*. 2022. Vol. 50. Issue 7. Pp. 1999–2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3177754>.
3. Bozhko I.V., Kondratenko I.P., Lobanov L.M., Pashchin M.O., Berdnikova O.M., Mykhodui O.L., Kushnarova O.S., Goncharov P.V. Pulsed Barrier Discharge for Treatment of Surfaces of 25KhGNMT Steel Plates. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2023. No 1. Pp.76–80. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2023.01.076>.
4. Samoilovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V. The physical chemistry of the barrier discharge. Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo Gosudarstvennogo Universiteta, 1989. 176 p. (Rus)
5. Olof Nilsson J., Eninger Jan E. Numerical Modeling of Ozone Production in a Pulsed Homogeneous Discharge: A Parameter Study. *IEEE Transactions on plasma science*. 1997. Vol. 25. No 1. Pp. 73–82.
6. Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Fundamentals and Applications. Edited by Mihaela I. Stefan. IWA Publishing, 2018. 712 p. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781780407197>.
7. Vanraes P., Nikiforov A.Y., Leys C. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutants. *Plasma Science and Technology. Plasma Science and Technology – Progress in Physical States and Chemical Reactions*. 2016. Pp. 429–476. DOI: <https://doi.org/10.5772/61830>.
8. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Mingbo Wu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 236. Pp. 348–363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>.
9. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Yield of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. No 6. Pp. 1043–1050. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2691726>.
10. Bereka V.O., Bozhko I.V., Kondratenko I.P. Research of energy efficiency of processing by pulse barrier discharge of water in a drop-film state. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2021. No 3. Pp. 50–57. (Ukr). DOI: <https://doi.org/1015407/techmed2021.03.050>.
11. Pokryvalo A., Wolf M., Yankelevich Y. Investigation of Operational Regimes of a High-Power Pulsed Corona Source with an All-solid State Pulsar. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2007. Vol. 14. No 4. Pp. 846–857. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.4286515>.
12. Uhm H.S. An Analytical Theory of Corona Discharge Plasma. *Physics of Plasmas*. 2000. Vol. 4. No 9. Pp. 3117–3128. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.872451>.
13. 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. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2016.02.063>
14. Meerovich L.A., Vatin I.M., Zaitsev E.V., Kandykin V.M. Magnetic generators of pulses. Moskva: Sovetskoe radio, 1968. 476 p. (Rus)
15. Singh S., Serdyuk Y.V., Gubanski S.M. Simulations of electrical discharges in air using stabilized drift-diffusion model. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2018. Vol. 46. Issue 8. Pp. 3031–3039. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2850803>.

Надійшла 20.02.2023
Остаточний варіант 27.03.2023