

ВПЛИВ З'ЄДНУВАЛЬНОГО ВИСОКОВОЛЬТНОГО КАБЕЛЮ НА СТРУМИ І НАПРУГИ У ПРИСТРОЇ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ

В.О. Берека^{*}, докт. філософії, Ю.М. Васецький^{**}, докт. техн. наук,

І.П. Кондратенко^{***}, чл.-кор. НАН України

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com.

Статтю присвячено дослідженню впливу з'єднувального кабелю як елемента з розподіленими параметрами між генератором імпульсів і розрядною камерою в електротехнічному комплексі на основі імпульсного бар'єрного розряду на значення струмів і напруг в системі. На основі експериментальних досліджень і моделювання встановлено, що струми на різних кінцях кабелю суттєво відрізняються один від одного, що обумовлено значним ємнісним імпульсним струмом зарядження кабелю. Знайдено, що під час бар'єрного розряду коректно виміряний імпульс струму має значно меншу тривалість, ніж імпульс напруги. За електричного розряду особливістю залежності струму на вході до кабелю є поява додаткового локального максимуму, значно меншої амплітуди з часовим зсувом, що дорівнює часу пересування електромагнітної хвилі вздовж кабелю. Показано, що використання з'єднувального кабелю збільшеної довжини дає можливість підвищити напругу між електродами порівняно з напругою на вході до кабелю, максимально удвічі без врахування падіння напруги на внутрішньому опорі генератора за довжини кабелю не меншою, ніж подвійна довжина шляху, що проходить електромагнітна хвиля за час досягнення максимуму імпульсу генератора. Бібл. 16, рис. 7.

Ключові слова: імпульсний бар'єрний розряд, з'єднувальний кабель з розподіленими параметрами, експериментальне дослідження, simulink-модель.

Вступ. Технології створення низькотемпературної плазми за рахунок використання імпульсної техніки набули доволі широкого спектру застосувань протягом останніх десятиріч. З однієї сторони цей інтерес зумовлений тим, що імпульсна техніка здатна забезпечити суттєво вищу потужність, передану за короткий проміжок часу [1, 2], який знаходиться в мікро- та нано-секундному діапазоні, на відміну від застосування розрядів постійної та змінної напруги. З іншої сторони відсутність суттєвого перегріву газу в плазмовій зоні сприяє ефективному протіканню плазмо-хімічних реакцій і насиченню розрядного проміжку продуктами цих реакцій [3]. Під продуктами реакцій у даному контексті розуміються радикали ОН, О, які є хімічно нестабільними і мають високу реакційну здатність до взаємодії з молекулами органічної природи, а також молекули Н₂О₂, О₃, тощо, а технології, основним предметним направленням яких є ефективна генерація та застосування цих речовин, називаються АОТ's (*advanced oxidation technologies*). Серед багатьох затребуваних видів АОТ's є електророзрядні технології на основі імпульсних бар'єрних розрядів (ІБР), які на сьогоднішній час застосовуються та всебічно вивчаються у таких сферах, як сільське господарство [4], медицина [5, 6], обробка води та вихлопних газів [7], дезодорація [8], модифікації поверхні матеріалів різного роду [9–11]. Оскільки принцип роботи технологій на ІБР побудовано на використанні та перетворенні електричної енергії, то для точної кількісної оцінки енерго-ефективності даних технологій принципове значення має, зокрема, коректне вимірювання електричних показників розряду.

На ефективність використання енергії ІБР впливають багато факторів в залежності від сфери застосування. При цьому головними вихідними характеристиками пристроїв, в яких використовується ІБР, є величина та залежність від часу напруги та струму в розрядній камері, а також просторовий характер самого розряду (однорідний чи неоднорідний). На перелічені характеристики впливають: конструктивні особливості і параметри роботи джерела імпульсної напруги [12],

© Берека В.О., Васецький Ю.М., Кондратенко І.П., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0003-0888-2864>; ** <https://orcid.org/0000-0002-4738-9872>;

*** <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

конфігурація і розміри електророзрядної камери [12], наявність високовольтного екранованого кабелю, що з'єднує джерело і розрядну камеру тощо.

Вплив вихідної ланки джерела живлення на характеристики ІБР, детальний аналіз якої із визначенням оптимальних взаємоузгоджених параметрів, виконано у [13]. В роботі, зокрема, встановлено, що у пристрою для обробки імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельно-плівковому стані завдяки узгодженню параметрів вихідної ланки генератора імпульсів та робочої камери вдається суттєво підвищити енергоефективність електророзрядного комплексу.

Одним з шляхів підвищення ефективності роботи технологічних пристроїв є отримання однорідного просторового характеру розряду в міжелектродному проміжку з відсутністю його шнуровання. Такий вид розряду забезпечує значно більшу усереднену по об'єму робочої камери концентрацію електронів порівняно, наприклад, з використанням коронного розряду [14]. Як показали дослідження [15], на отримання однорідного характеру ІБР найбільш суттєво впливають такі параметри: тривалість імпульсу напруги, крутизна його фронту, відстань між електродами і діелектричним бар'єром, а також діелектрична проникність бар'єру та ряд інших факторів.

Вивченню впливу високовольтного кабелю, що з'єднує генератор імпульсів (ГІ) і розрядну камеру (РК), на результати вимірювання струмів і напруг під час застосування ІБР на даний час приділялася значно менша увага. З технологічних причин ГІ і РК віддалені один від одного на певну відстань, зазвичай не менше 1 м. Для кабелів зі швидкістю розповсюдження електромагнітних хвиль $(1-2) \cdot 10^8$ м/с час розповсюдження сигналу по кабелю такої довжини складає 5-10 нс, що вже стає співрозмірним з часом фронту імпульсів $\sim 20-30$ нс. Крім того, ємність кабелю може перевищувати ємність електродної системи, що потребує врахування ємнісних струмів в системі, які є співставними зі струмом електричного розряду. Нарешті, явище відбиття електромагнітної хвилі від кінця кабелю, де розташована розрядна камера, може бути використано для збільшення величини імпульсної напруги між електродами. Це пов'язано з відбиттям хвилі по суті від розімкненого кінця лінії, через що напруга збільшується удвічі (коли час імпульсу значно перевищує постійну часу $z_c C_e$, де z_c – хвильовий опір кабелю без втрат, C_e – ємність електродної системи).

Метою роботи є визначення впливу з'єднувального кабелю (ЗК) як елемента з розподіленими параметрами електротехнічного комплексу створення імпульсного бар'єрного розряду на значення струмів і напруг під час підключення вимірювальної техніки біля ГІ та РК, врахування особливостей впливу кабелю на залежність вимірювальних величин за наявності струму розряду, а також можливості збільшення імпульсної напруги на електродній системі порівняно з напругою на клеммах ГІ.

Елементи електророзрядної системи та розрахункова модель визначення впливу з'єднувального кабелю на величини напруг і струмів. У даній роботі параметри більшості елементів системи для застосування ІБР відповідають реальним даним пристрою, що приводяться в опублікованих джерелах, однак деякі складові системи, які найбільш впливають на характеристики, що розглядаються, представлені у спрощеному вигляді. Система складається з трьох основних блоків: ГІ, ЗК і РК. У роботі представлено результати вимірювань на реальній діючій установці та розрахунки моделювання на запропонованій SIMULINK-моделі (рис. 1).

Подачу уніполярних імпульсів напруги з амплітудою до 30 кВ, тривалістю порядку 100 нс та фронтом (ділянкою найбільшої швидкості зростання) 20-25 нс забезпечує ГІ, що реалізується на певному часовому проміжку. У моделі в блоці ГІ враховано тільки вихідне коло реального пристрою [13], яке складається з індуктивностей $L_1 = 1$ мкГн, $L_2 = 3$ мкГн, опорів $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 1$ м Ом, ємності $C_1 = 1.1$ пФ [1]. Напруга знімається з еквівалентного вихідного опору $R = 128$ Ом. Для зручності моделювання параметрів імпульсу напруги введено джерело імпульсів, напруга якого змінюється за законом у часі $u(t) = -U_m \sin^n(\omega t)$. Результати представлено для обраних параметрів $n = 2$, $\omega = (\pi/160)10^9$ с⁻¹, для яких амплітудне значення напруги джерела досягається у момент часу $t_m = 80$ нс і має максимальну швидкість зміни $du/dt = -U_m \omega$ за $t = 40$ нс. Одночасно в моделі початкова напруга на ємності приймається рівною нулю.

Електродна система, схематично зображена на рис. 2, являє собою два циліндричних електроди з нержавіючої сталі 1 і бронзи 3 діаметром, відповідно, 28 мм і 29 мм. До заземленого електроду з бронзи приклеєно скло 2 з розмірами $87 \times 80 \times 1$ мм³ і відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 4.7$. Довжина газового проміжку d у представлених далі результатах складала 1.5 мм.

Виміряна ємність електродної системи є $C_e = 5.3$ пФ. Для врахування струму електричного розряду у моделі передбачено можливість підключення джерела імпульсу струму.

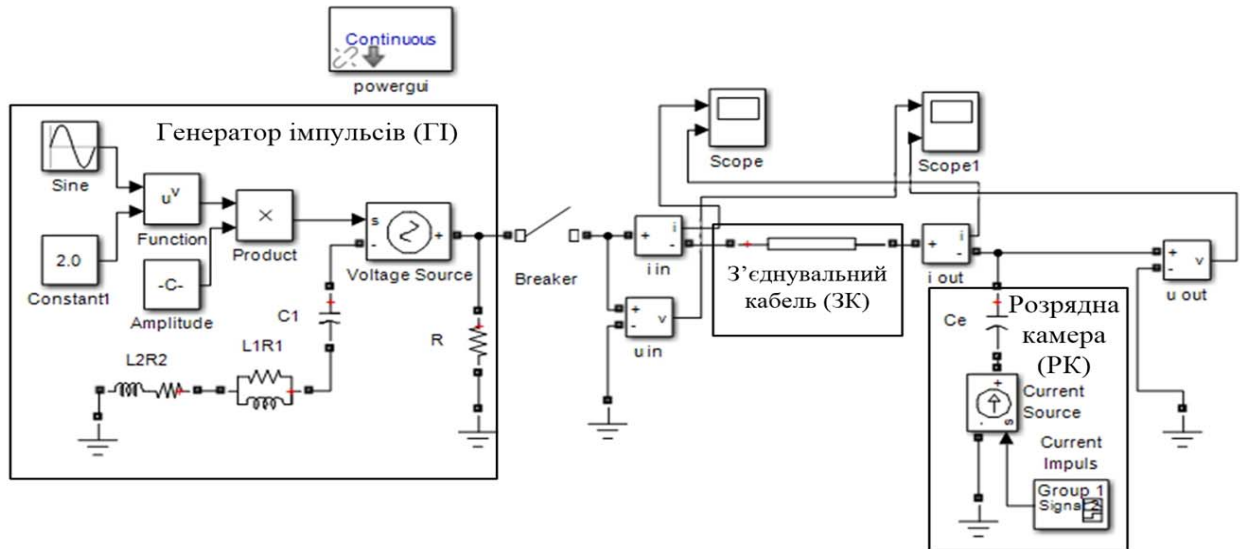


Рис. 1

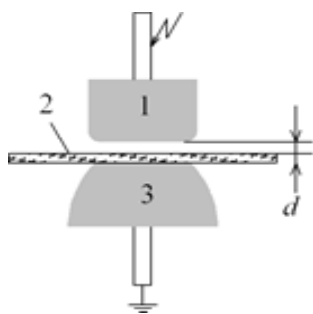


Рис. 2

Для з'єднання між собою ГІ і РК використовувалися два типи кабелю, втрати в яких можна вважати відсутніми. За низької напруги у 6 кВ, коли електричний бар'єрний розряд не запалюється, в експериментах і розрахунках використовувався кабель з ємністю і індуктивністю на одиницю довжини відповідно $C_{01} = 66.7 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $L_{01} = 0.375 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. Для цього кабелю швидкість електромагнітної хвилі та хвильовий опір є $v_1 = (L_{01}C_{01})^{-1/2} = 1.98 \cdot 10^8$ м/с, $z_{c1} = (L_{01}C_{01})^{1/2} = 75$ Ом. За більшої напруги в умовах існування бар'єрного розряду в експериментах використовувався кабель з більшою товстотою ізоляції. Параметри цього кабелю довжиною 1 м також закладалися в розрахункову модель і складали: $C_{02} = 110 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $L_{02} = 0.7 \cdot 10^{-6}$ Гн/м, $v_2 = 1.14 \cdot 10^8$ м/с, $z_{c2} = 79.8$ Ом.

Напруги і струми вимірювалися та розраховувалися на вході до кабелю та біля розрядної камери. Для цього в експериментах застосовувалися датчики напруги P1015 та струму P6021, сигнал від яких подавався на цифровий осцилограф TDS 1012, смуга частот пропускання та чутливість вимірювальних приладів були достатніми задля отримання достовірних даних. У розрахунковій моделі для цих цілей передбачені вимірювальні блоки напруги "u in, u out" та струмів "i in, i out", сигнали яких передавалися на віртуальні осцилографи "scope, scope1".

Вплив кабелю обмеженої довжини на значення напруг і струмів. Під обмеженою довжиною уявляється така довжина, яка є достатньою для проведення експериментів. Конкретно за напруги 6 кВ застосовувався кабель довжиною $l_1 = 1.33$ м; за більшої напруги інший кабель мав довжину $l_2 = 1$ м.

Напруги та струми за відсутності електричного розряду. Незважаючи на те, що призначення пристрою передбачає роботу саме за наявності бар'єрного розряду, однак розгляд режиму без розряду дає змогу уявити суттєві особливості зміни струмів і напруг у часу, які не ускладнюються наявністю додаткового струму електричного розряду.

Під час подачі імпульсу напруги від ГІ пряма електромагнітна хвиля переміщається вздовж кабелю. Її залежність від часу і координати точки на кабелю x , що відраховується від точки підключення до ГІ $u_{np}(t - x/v_1)$ для $t - x/v_1 \geq 0$, визначається з розрахунку перехідного процесу для кола із зосередженими параметрами, показано на рис. 3, а [16]. Розрахована залежність u_{np} від часу у відносних одиницях показана на рис. 3, б кривою U01. За формою залежність незначною мірою відрізняється від кривої напруги джерела імпульсів U_s , однак падіння напруги на

внутрішньому опорі ГІ обумовлює зменшення амплітуди у 1.7 рази. Коли сигнал через час $\Delta t_1 = l_1/v_1 = 6.7 \cdot 10^{-9}$ с доходить до ємнісного елементу розрядної камери у вигляді падаючої хвилі $u_{\text{пад}} = u_{\text{пр}}(t + \Delta t_1 - l_1/v_1) = u_{\text{пр}}(t, 0)$, він відбивається і у вигляді зворотної хвилі $u_{\text{отр}}$ розповсюджується у зворотному напрямку. Напряга на навантаженні є $u_{\text{н}} = u_{\text{пад}} + u_{\text{отр}}$. Розрахунок перехідного процесу відбиття хвилі також можливо виконати для відповідного кола із зосередженими параметрами, показаного на рис. 3, в. Після перехідного процесу у $z_c C_e$ -колі на ємності встановлюється подвійне значення напруги падаючої хвилі. Оскільки постійна часу $z_{c1} C_e = 4.2 \cdot 10^{-10}$ с значно менша за час Δt_1 , то подвійне значення встановлюється практично миттєво. Результати розрахунку показано на рис. 3, з, де напруга падаючої хвилі позначена як U_{ef} , а напруга навантаження – U_{el} . Напруга відбитої хвилі за величиною дорівнює напрузі падаючої хвилі, яка через час Δt_1 досягає ГІ, де знову відбувається її відбиття, характеристики якого визначаються параметрами кола ГІ. Починаючи з цього моменту часу, значення напруги на кабелі поблизу ГІ визначається сумою вихідного імпульсу в момент часу $2\Delta t_1$ і напругою на ГІ, пов'язаною з відбиттям вже зворотної хвилі. На довжині кабелю $l_1=1.33$ м по досягненні часу $t_m = 80 \cdot 10^{-9}$ с амплітудного значення напруги імпульсу має місце досить значна кількість відбиттів хвилі $t_m/\Delta t_1 = 12$.

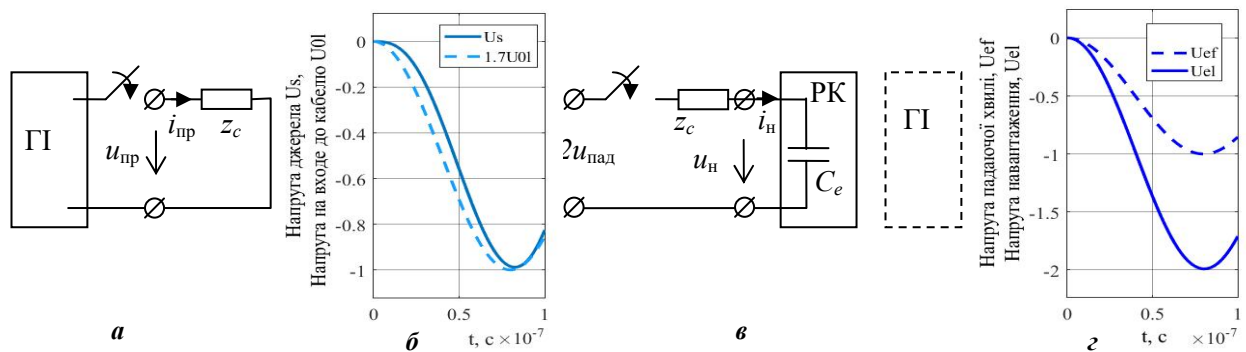


Рис. 3

У випадку $t_m/\Delta t_1 \gg 1$ досягається усталене значення напруг і струмів, і коло з довгою лінією може бути замінено колом із зосередженими параметрами, в якому необхідно врахувати загальне значення ємності $C_{c1} = 88.7 \cdot 10^{-12}$ Ф і індуктивності кабелю $L_{c1} = 0.5 \cdot 10^{-6}$ Гн. Оскільки ємність кабелю значно більша за ємність електродної системи $C_e = 5.3 \cdot 10^{-12}$ Ф, то ємнісний струм зарядки кабельної лінії значно перевищує ємнісний струм в електродній системі. Для обраної залежності напруги від часу і її максимальної величини $U_m = 6 \cdot 10^3$ В ємнісний струм $i_c = C du/dt = C\omega U_m \sin(2\omega t)$ має максимальні значення для кабелю і електродів відповідно: $i_{c1} = 10.5$ А, $i_{e1} = 0.62$ А. Одночасно, напруги на кабелі біля ГІ і РК відрізняються незначною мірою. Різниця визначається падінням напруги на індуктивності кабелю $\Delta u_L = L di/dt \approx L_c C_c \omega^2 U_m \cos(2\omega t)$ і має максимальне значення $\Delta u_{L1} = 102$ В $\ll U_m$.

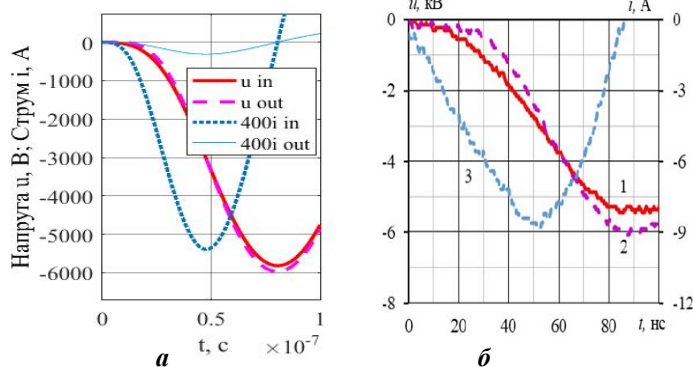


Рис. 4

Теоретичні оцінки підтверджуються результатами моделювання (рис. 4, а) і експериментальними даними на реальній дослідницькій установці (рис. 4, б, де 1 – напруга на початку кабелю, 3 – струм на початку кабелю; 2 – напруга в кінці кабелю). Це стосується як характеру часових залежностей, так і значень виміряних і розрахованих величин.

Напруги і струми за наявності бар'єрного електричного розряду. Електрофізичні процеси, що пов'язані з електророзрядними явищами в електродній системі у разі реалізації однорідного бар'єрного розряду, мають першорядний вплив на залежності струму i , відповідно, напруги від часу. Разом з цим під час використання залежностей, що реалізуються у процесі розряду, стає можливим дослідження впливу ЗК на різницю у показках для струму і напруги на затискачах ГІ та на електродній системі. З цієї позиції розглянемо результати експерименту в умовах дії електричного розряду. На рис. 5 (а, б) представлено часові залежності напруги (суцільні криві) і струму (пунктир), що виміряні на електродній системі (а) та на виході ГІ (б) за амплітудної напруги 21 кВ. У даному випадку використовувався високовольтний кабель довжиною 1 м, параметри якого надано вище.

З рисунків видно, що залежність від часу струмів по різні боки ЗК дуже відрізняються. Біля електродної системи спостерігається тільки імпульс струму через електродну систему. В той же час з боку ГІ у струмі значну частку складає ємнісний струм зарядження ємності кабелю. Тут наявність струму розряду може бути пов'язана з другим максимумом струму, який має значно меншу амплітуду.

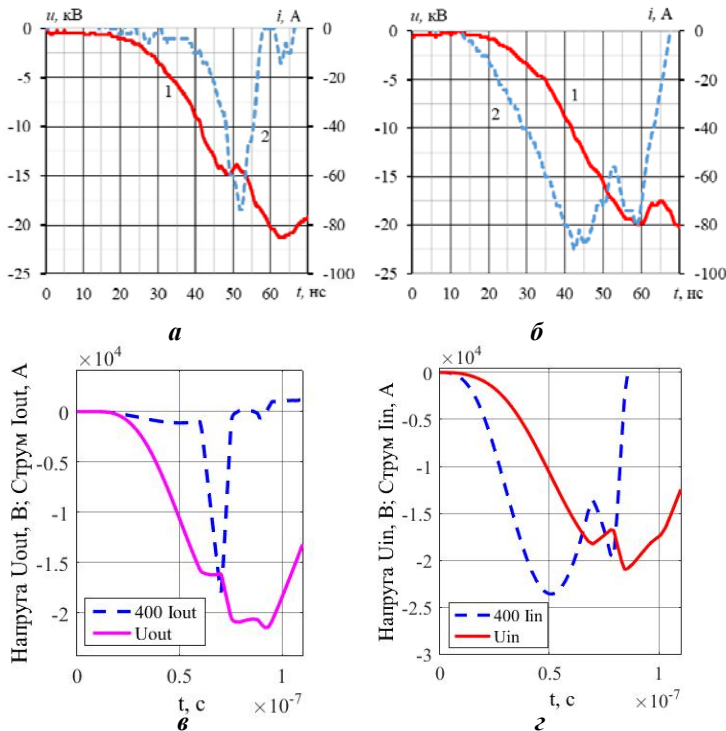


Рис. 5

Для підтвердження такого висновку було проведено моделювання за допомогою SIMULINK-моделі. Імпульс струму через електродну систему задавався у моделі елементом *Current Source*. Параметри імпульсу струму (рис. 5, в) в цілому відповідають імпульсу струму реального розряду на рис. 5, а. Залежність струму біля ГІ (рис. 5, г) у моделі має ті ж особливості, що спостерігаються в експерименті. Але під час моделювання протікають тільки ємнісний струм і імпульсний струм джерела. Однаковий вигляд кривих струму дає можливість зробити досить достовірне припущення, що в даному випадку наявність другого піку струму на рис. 5, б і 5, г пов'язане саме з імпульсом струму через електродну систему. Таке припущення підтверджується також однаковою величиною зсуву часу в експерименті і під час моделювання між імпульсом та

другим піком струму у процесі вимірювання біля ГІ. Цей час складає ~ 9 нс. Такий час потрібен, щоб електромагнітна хвиля пройшла шлях від електродів до ГІ, рівний довжині кабелю: $\Delta t_2 = l_2/v_2 = 8.8 \cdot 10^{-9}$ с. Треба однак зауважити, що у системі, яка містить довгу лінію з розподіленими параметрами, для імпульсів меншої тривалості кількість відбиттів електромагнітної хвилі протягом цього часу зменшується. Це може проявитися у появі додаткових піків в залежностях від часу напруги і струму. При цьому вони будуть більш виражені у кривих струму біля ГІ, оскільки визначаються у першу чергу зарядженням ємності лінії, яка пропорційна похідної від напруги. Відстань у часі між піками на кривих у цьому випадку визначається часом проходження електромагнітної хвилі подвійної довжини кабелю, тобто вдвічі більше порівняно з запізненням імпульсу струму розряду.

Вплив довжини кабелю на збільшення напруги між електродами. Для стійкого однорідного бар'єрного розряду заради забезпечення необхідної інтенсивності потоку високоенергетичних електронів в розряді, необхідно забезпечити прикладення до електродів достатньої високої імпульсної напруги. Той факт, що під час відбиття від розімкнутої довгої лінії імпульсна напруга подвоюється, може бути використано для отримання більш високої напруги на електродах порівняно з напругою, що подається на вхід лінії. Разом з цим, відбита хвиля, досягаючи кінця зі сторони ГІ, знову відбивається. При цьому вхідні параметри ГІ зі сторони підключення кабелю такі, що породжують відбиту хвилю протилежного знаку, порівняно з падаючою хвилею.

Тобто друга падаюча хвиля на електродну систему певним чином знижує напругу. Сказане пояснює рис. 6 за результатами моделювання процесу відбиття хвилі від ГІ у відповідності з рис. 3, в для першого кабелю, в якому швидкість хвилі складає $v_1 = 1.98 \cdot 10^8$ м/с.

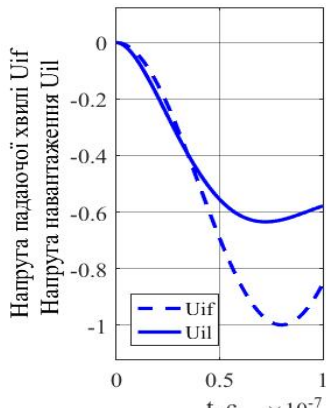


Рис. 6

З рис. 6 видно, що для імпульсу, що розглядається, протягом перших ~ 30 нс відбита хвиля $u_{отр} = u_H - u_{пад}$ має майже нульове значення. Далі ця вторинна відбита хвиля приймає значення з протилежним до падаючої знаком. Розповсюджуючись в напрямку електродної системи, сумарно вона зменшує подвійне значення напруг. Щоб запобігти зменшенню напруги на електродах до моменту досягнення максимуму напруги до цього часу, вторинна відбита хвиля не повинна досягти електродів. З цього розгляду випливає, що для того, щоб мати на електродах подвійне значення напруги, довжина ЗК повинна задовольняти умові: подвійна довжина кабелю повинна бути не меншою, ніж довжина шляху, що проходить хвиля за час t_m . Звідси для $t_m = 80 \cdot 10^8$ м/с маємо умову щодо довжини ЗК $l \geq t_m v_1 / 2 = 8$ м.

На рис. 7, а представлено дані з моделювання для кабелю довжиною $l = 9$ м, де розраховано залежності від часу напруг і струмів біля ГІ (u_{in} , i_{in}) та біля РК (u_{out} , i_{out}). Вважалося, що електричний розряд є відсутнім, і тому було обрано попередню амплітуду напруги 6 кВ. Видно, що в цьому випадку напруга на електродну систему починає поступати із запізненням у 45 нс. Її значення на електродах збільшується удвічі до 12 кВ. При цьому час зростання напруги не змінюється.

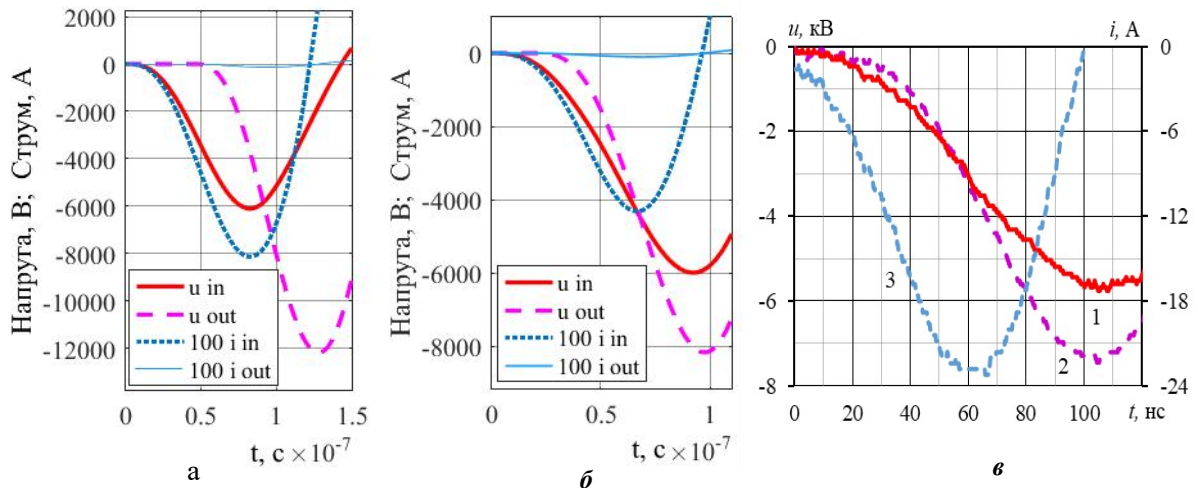


Рис. 7

Якщо довжина кабелю є меншою порівняно із зазначеною умовою, то у зв'язку з впливом відбиттів електромагнітної хвилі амплітудне значення напруги на електродах буде меншим, ніж подвійне значення напруги біля ГІ. З метою підтвердження для кабелю довжиною 4 м було проведено моделювання і експериментальне дослідження на діючому пристрою. Відповідні результати представлено на рис. 7, б і в, де стиль кривих такий же, як на рис. 7, а. У цьому випадку напруга теж збільшується, але тільки приблизно у 1.3 рази.

Використання довгого кабелю для збільшення напруги на електродах одночасно призводить до зростання струму у кабелі у місці підключення до ГІ. Зростання струму на виході з ГІ буде обумовлювати і збільшення падіння напруги на внутрішньому опорі джерела. Тому, оскільки у реальному ГІ напруга на клеммах пов'язана з розрядженням ємності, то в дійсності ефект від підключення довгої лінії може виявитися не настільки ефективним. Це питання потребує спеціальних додаткових досліджень на діючій установці і моделювання з урахуванням реальної схеми пристрою.

Висновки.

1. В електротехнічному комплексі для створення однорідного імпульсного бар'єрного розряду зі з'єднувальним кабелем між ГІ і РК довжиною не меншою 1 м для імпульсів наносекундного

діапазону значення струму на різних кінцях кабелю суттєво відрізняються, що пов'язано з протіканням ємнісного струму зарядки кабелю, який значно перевищує ємнісний струм в електродній системі. Це свідчить про необхідність проводити вимірювання безпосередньо біля електророзрядної камери.

2. Експериментальні вимірювання біля РК і моделювання з урахуванням хвильових властивостей ЗК показали, що за бар'єрного розряду тривалість імпульсу струму розряду є значно меншою, ніж проміжок часу досягнення максимальної напруги ГІ. Біля ГІ наявність імпульсного розряду проявляється лише у появі додаткового локального максимуму струму незначної амплітуди, який має місце з запізненням у часі, що дорівнює часу переміщення електромагнітної хвилі вздовж кабелю.

3. Використання з'єднувального кабелю збільшеної довжини дає змогу підвищити напругу між електродами порівняно з напругою на вході лінії максимум удвічі за умови нехтування падінням напруги на внутрішньому опорі 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)», КПКВК 6541030.

1. Iza F., Walsh J.L., Kong M.G. From submicrosecond-to nanosecond-pulsed atmospheric-pressure plasmas. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2009. Vol. 37. No 7. Pp. 1289–1296. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2014766>.
2. Yang D., Wang W., Zhang S., Tang K., Liu Z., Wang S. Multiple current peaks in room-temperature atmospheric pressure homogenous dielectric barrier discharge plasma excited by high-voltage tunable nanosecond pulse in air. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. No 19. Pp. 194102-1–194102-5. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4804583>.
3. do Nascimento F., da Graça Sampaio A., Milhan N.V.M., Gontijo A.V.L., Mattern Ph., Gerling T., Robert E., Koga-Ito C.Yu., Kostov K.G. A Low Cost Flexible Atmospheric Pressure Plasma Jet Device With Good Antimicrobial Efficiency. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences.* 2024. Vol. 8. No 3. Pp. 307–322. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2023.3342709>.
4. Misra N.N., Schluter O., Cullen P.J., Waltham MA. Cold Plasma in Food and Agriculture. USA: Academic Press, 2016. 380 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00001-9>.
5. Metelmann H.-R., von Woedtke T., Weltmann K.-D. Comprehensive Clinical Plasma Medicine. New York, USA: Springer International Publishing, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67627-2>.
6. Cretu D.-E., Rusu C.-C., Burlica R., Beniuga O., Astanei D., Tesoi D. DBD Non-Thermal Plasma Used on Surface Treatment of Polymeric Film for Food Packaging. International Conference on *Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. Iasi. Romania, 06–08 October 2021. Pp. 454–457. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIELMEN53755.2021.9600314>.
7. Inhwan. H., Jongku. J., Taesuk. Y., Jinmu. J. Water electrode plasma discharge to enhance the bacterial inactivation in water. *Biotechnol. Equip.* 2018. No 32. Pp. 530–534. DOI: <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1321969>.
8. Schmidt M., Holub M., Jogi I., Sikk M. Treatment of industrial exhaust gases by a dielectric barrier discharge. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2016. No 75. P. 24708. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2016150554>.
9. Лобанов Л.М., Сизоненко О.М., Рябцев І.О., Пашин М.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П., Торпаков А.С., Міходуй О.Л., Соломійчук Т.Г. Удосконалення технології виготовлення модифікаторів системи ti–tic та дослідження їх впливу на структуру наплавленого металу типу 25Х5ФМС. *Автоматичне зварювання*. 2023. № 2. С. 3–9.
10. Li S., Ding Y., Zhao Y., Yu J., Liu F., Fang Z. Effect of pulse voltage slew rate on the uniformity of polypropylene surface hydrophilic modification by nanosecond pulsed dielectric barrier discharge. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Denver, CO, USA, 30 October – 02 November 2022. Pp. 538–541. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP55452.2022.9985297>.
11. Божко І.В., Кондратенко І.П., Лобанов Л.М., Пашин М.О., Берднікова О.М., Міходуй О.Л., Кушнарєва О.С., Гончаров П.В. Застосування імпульсного бар'єрного розряду для обробки поверхні пластин зі сталі марки 25ХГНМТ. *Техн. електродинаміка*. 2023. № 1. С. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.076>.
12. Malik M. A. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>.
13. Берека В.О., Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П. Взаємозгодження параметрів джерела живлення та робочої камери для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом. *Техн. електродинаміка*. 2023. № 4. С. 81–89. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.081>.
14. Haixia Wu, Jiawei Fan, Yanhua Xu, Feng Liu, Zhi Fang. Organic pollutants treatment in a water aerosol reactor by pulsed corona discharge at atmospheric pressure. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. The Third International Workshop on *Environment and Geoscience*, Chengdu, China, 18–20 July 2020. Vol. 569(1). 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/569/1/012029>.
15. Божко І.В., Берека В.О. Однорідність імпульсного бар'єрного розряду в атмосферному повітрі за присутності води в краплинно-плівковому стані. *Техн. електродинаміка*. 2019. № 5. С. 17–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.017>.
16. Жуховицкий Б.Я., Негневицкий И.Б. Теоретические основы электротехники: учебник. Т. 2. Москва: Энергия, 1972. 200 с.

THE INFLUENCE OF THE CONNECTING HIGH-VOLTAGE CABLE TO THE CURRENTS AND VOLTAGES IN DEVICE OF PULSED DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE

V.O. Bereka, Yu.M. Vasetsky, I.P. Kondratenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: yuriy.vasetsky@gmail.com.

The article is devoted to the study of the connecting cable influence, as an element with distributed parameters between the pulsed generator and discharge chamber in the electrical complex based on pulsed barrier discharge, to the values of currents and voltages in the system. Based on experimental studies and modeling, it has been established that the currents at different ends of the cable differ significantly from each other, which is due to the large value capacitive pulsed charging current of the cable. It has been established that during the barrier discharge, a correctly measured pulse current has significantly shorter duration than pulse of voltage. During the electrical discharge, a feature of the dependence of the current at the input to the cable is the appearance of an additional local maximum, of much smaller amplitude with a time shift equal to the time the electromagnetic wave movement along the cable. It has been shown that the use of the connecting cable of increased length makes it possible to increase the voltage between the electrodes of two times in comparison with the voltage at the cable input, without taking into account the voltage drop across the internal resistance of the generator when the cable length no less than twice the path length that the electromagnetic wave moves during the time from start of the pulse to maximum value generator pulse. References 16, figures 7.

Key words: pulsed barrier discharge, connecting cable with distributed parameters, experimental study, simulink-model.

1. Iza F., Walsh J.L., Kong M.G. From submicrosecond-to nanosecond-pulsed atmospheric-pressure plasmas. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2009. Vol. 37. No 7. Pp. 1289–1296. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2014766>.
2. Yang D., Wang W., Zhang S., Tang K., Liu Z., Wang S. Multiple current peaks in room-temperature atmospheric pressure homogenous dielectric barrier discharge plasma excited by high-voltage tunable nanosecond pulse in air. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. No 19. Pp. 194102-1–194102-5. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4804583>.
3. do Nascimento F., da Graça Sampaio A., Milhan N.V.M., Gontijo A.V.L., Mattern Ph., Gerling T., Robert E., Koga-Ito C.Yu., Kostov K.G. A Low Cost Flexible, Atmospheric Pressure Plasma Jet Device With Good Antimicrobial Efficiency. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences.* 2024. Vol. 8. No 3. Pp. 307–322. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2023.3342709>.
4. Misra N.N., Schluter O., Cullen P.J., Waltham MA. Cold Plasma in Food and Agriculture. USA: Academic Press, 2016. 380 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00001-9>.
5. Metelmann H.-R., von Woedtke T., Weltmann K.-D. Comprehensive Clinical Plasma Medicine. New York, USA: Springer International Publishing. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67627-2>.
6. Cretu D.-E., Rusu C.-C., Burlica R., Beniuga O., Astanei D., Tesoi D. DBD Non-Thermal Plasma Used on Surface Treatment of Polymeric Film for Food Packaging. International Conference on *Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*. Iasi, Romania, 06–08 October 2021. Pp. 454–457. DOI: <https://doi.org/10.1109/SIELMEN53755.2021.9600314>.
7. Inhwon H., Jongku J., Taesuk Y., Jinmu J. Water electrode plasma discharge to enhance the bacterial inactivation in water. *Biotechnol. Biotechnol. Equip.* 2018. No 32. Pp. 530–534. DOI: <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1321969>.
8. Schmidt M., Holub M., Jogi I., Sikk M. Treatment of industrial exhaust gases by a dielectric barrier discharge. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2016. No 75. P. 24708. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2016150554>.
9. Lobanov L.M., Syzonenko O.M., Ryabtsev I.O., Pashchyn M.O., Babitets A.A., Lentiugov I.P., Torpakov A.S., Mikhodui O.L., Solomiichuk O.G. Improvement of technology of producing Ti-TiC modifiers and studying their impact on the structure of deposited metal of type 25Kh5FMS. *Avtomatychne zvariuvannia.* 2023. No 2. Pp. 3–9. (Ukr)
10. Li S., Ding Y., Zhao Y., Yu J., Liu F., Fang Z. Effect of pulse voltage slew rate on the uniformity of polypropylene surface hydrophilic modification by nanosecond pulsed dielectric barrier discharge. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. Denver, CO, USA, 30 October – 02 November 2022. Pp. 538–541. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEIDP5452.2022.9985297>.
11. Bozhko I.V., Kondratenko I.P., Lobanov L.M., Pashchin M.O., Berdnikova O.M., Mikhodui O.L., Kushnarova O.S., Goncharov P.V. Pulsed barrier discharge for treatment of surfaces of 25ХГНМТ steel plates. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2023. No 1. Pp. 76–81. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.01.076>. (Ukr)
12. Malik M. A. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? *Plasma Chemistry and Plasma Processing.* 2010. No 30. Pp. 21–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-009-9202-2>.
13. Bereka V.O., Bozhko I.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P. Coordination of parameters of the power source and the working chamber for water treatment with pulse barrier discharge. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2023. No 4. Pp. 81–89. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.081>. (Ukr)
14. Haixia Wu, Jiawei Fan, Yanhua Xu, Feng Liu, Zhi Fang. Organic pollutants treatment in a water aerosol reactor by pulsed corona discharge at atmospheric pressure. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science.* The Third International Workshop on *Environment and Geoscience*, Chengdu, China, 18-20 July 2020. Vol. 569(1). 012029. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/569/1/012029>.
15. Bozhko I.V., Bereka V.O. Uniform of pulse barrier discharge in the air of atmospheric pressure in the presence of water in a drop-film condition. *Tekhnichna elektrodynamika.* 2019. No 5. Pp. 17-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.017>
16. Zhuhovitskii B.Ya, Negnevitskii I.B. Theoretical foundations of electrical engineering. Vol. 2. Moskva: Energiia, 1972. 200 p.

Надійшла 02.05.2024