

УДК 537.523.9+621.373.54

ГЕНЕРАТОР КОРОТКИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСІВ З ІНДУКТИВНИМ НАКОПИЧУВАЧЕМ ЕНЕРГІЇ, ЯКИЙ КОМУТУЄТЬСЯ SOS-ДІОДОМ

І. П. Кондратенко, І. В. Божко, В. В. Кобильчак

Інститут електродинаміки Національної академії наук України
просп. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна. E-mail: vladimirkobylchak@gmail.com

Використання імпульсних електророзрядних технологій, зокрема з імпульсним бар'єрним розрядом, дозволяє досягати високих показників очистки води від забруднюючих її органічних речовин. Для створення ефективного розряду потрібні джерела живлення, які забезпечують високовольтні імпульси (10–30 кВ) з крутизною фронтів 10^{11} – 10^{12} В/с, загальна довжина яких складає 100–200 нс. Такі параметри імпульсного джерела живлення можуть досягатися шляхом використання індуктивного накопичувача енергії, що комутується SOS-діодом. На практиці реалізувати ефективну сумісну роботу джерела живлення та навантаження у вигляді розрядної камери, яка має нелінійний активно-ємнісний характер під час дії імпульсного бар'єрного розряду, завдання складне, тому проведено моделювання генератора імпульсів, що навантажений на розрядну камеру, в якій проходить бар'єрний розряд. При моделюванні враховувалися паразитні елементи розрядного кола, які при вказаних фронтах імпульсів можуть мати значний вплив на характеристики генератора імпульсів. Достовірність виконаного моделювання підтверджена порівнянням отриманих результатів із даними фізичних експериментів, що дає можливість знайти шляхом моделювання оптимальні параметри елементів генератора та розрядної камери. Визначено значення імпедансів розрядних камер з імпульсним бар'єрним розрядом, при яких коефіцієнт передачі енергії від генератора імпульсів до них буде найвищим. Таке значення імпедансу розрядних камер знаходиться в певному діапазоні (~ 100–150 Ом). Для розрядних камер з імпедансом, що виходить за ці межі, до генератора доцільно вводити узгоджувальний імпульсний трансформатор між ним та камерою.

Ключові слова: імпульсний генератор, SOS-діод, імпульсний бар'єрний розряд.

ГЕНЕРАТОР КОРОТКИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСІВ С ІНДУКТИВНИМ НАКОПИТЕЛЕМ ЕНЕРГІЇ, КОТОРИЙ КОМУТИРУЄТЬСЯ SOS-ДИОДОМ

І. П. Кондратенко, І. В. Божко, В. В. Кобильчак

Інститут електродинаміки Национальной академии наук Украины
просп. Победы, 56, Киев, 03680, Украина. E-mail: vladimirkobylchak@gmail.com

Использование импульсных электроразрядных технологий, в частности с импульсным барьерным разрядом, позволяет достигать высоких показателей очистки воды от загрязняющих органических веществ. Для создания эффективного разряда нужны источники питания, обеспечивающие высоковольтные импульсы (10–30 кВ) с крутизной фронтов 10^{11} – 10^{12} В/с, общая длина которых составляет 100–200 нс. Такие параметры импульсного источника питания могут быть получены путем использования индуктивного накопителя энергии, коммутируемого SOS-диодом. На практике реализовать эффективную совместную работу источника питания и нагрузки в виде разрядной камеры, которая имеет нелинейный активно-емкостной характер во время действия импульсного барьерного разряда, задача сложная. Поэтому проведено моделирование генератора импульсов, нагруженного на разрядную камеру, в которой проходит барьерный разряд. При моделировании учитывались паразитные элементы разрядной цепи, которые при указанных фронтах импульсов могут иметь значительное влияние на характеристики генератора импульсов. Достоверность моделирования была подтверждена методом сравнения полученных результатов с данными физических экспериментов. Она дает возможность определять оптимальные параметры элементов генератора и разрядной камеры путем моделирования. Определены значения импеданса для разрядных камер с импульсным барьерным разрядом, при которых коэффициент передачи энергии от генератора импульсов к ним будет наивысшим. Такое значение импеданса разрядных камер находится в определенном диапазоне (~ 100–150 Ом). Для разрядных камер с импедансом, который выходит за эти пределы, целесообразно в генератор вводить согласующий импульсный трансформатор между ним и камерой.

Ключевые слова: импульсный генератор, SOS-диод, импульсный барьерный разряд.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Питна, технічна та стічна вода потребують очистки, для чого існує багато хімічних, фізичних та інших способів, але не всі вони є ефективними при обробці води, що містить органічні домішки. Останнім часом одним з ефективних методів очищення води від органічних сполук є використання імпульсних електророзрядних технологій [1, 2], зокрема тих, де застосовується імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) [3], який успішно використовується при обробці води вже більше десятиліття й описаний у багатьох публікаціях

[4–7]. Для створення цього розряду потрібні джерела живлення, які генерують високовольтні імпульси (10–30 кВ) з крутизною фронтів 10^{11} – 10^{12} В/с при їх загальній довжині 100–200 нс [1]. Частота слідування цих імпульсів повинна бути 10 – 10^3 , а енергія імпульсу, як правило, – 0,01–1 Дж.

Імпульсні генератори відрізняються за схемними рішеннями та типами ключів, які в них використовуються. Побудова імпульсного генератора залежить від методу накопичення енергії, який у свою чергу може бути ємнісним або індуктивним. Най-

більш поширеними ключами в таких генераторах є розрядники, напівпровідникові ключі (тиристри, транзистори та ін.), а також магнітні ключі [8, 9].

Використання розрядників дозволяє отримувати імпульси з потрібними параметрами, але вони мають низку надійності, головні з яких – обмежений ресурс роботи, значний розкид величин напруги їх спрацювання та неможливість їх застосування при підвищеній частоті повторення імпульсів.

Тиристри та транзистори порівняно з розрядниками при номінальних навантаженнях мають значно більший ресурс роботи, але вони не дозволяють отримувати короткі імпульси із зазначеною довжиною та амплітудами напруги в десятки кіловат. Перспектива за магнітними ключами, які працюють за принципом магнітного стискання імпульсу. Разом з тим отримати імпульс довжиною в десятки наносекунд за допомогою лише магнітного стискання доволі складно. Для цього потрібно декілька ступенів стискання, що ускладнює конструкцію джерела живлення та зменшує його коефіцієнт корисної дії [9].

Останнім часом з'явилась низка експериментальних робіт, в яких розглядається використання SOS-діодів у генераторах імпульсів [4, 10, 11]. З них випливає, що характеристики вихідного імпульсу на навантаженні суттєво залежать від співвідношення параметрів елементів розрядного кола, до якого входить SOS-діод. Але оскільки виконані раніше дослідження мають експериментальний характер і відносяться до генераторів для живлення коронного розряду, то при розробці генераторів імпульсів для живлення бар'єрного розряду є необхідність більш детального аналізу шляхом моделювання впливу елементів електричної схеми на параметри імпульсів у навантаженні. Ця робота присвячена розробці такого генератора. На відміну від попередніх досліджень [4], у ній враховано паразитні ємності та індуктивності елементів розрядного кола, які при вказаних фронтах імпульсів можуть суттєво впливати на вихідні параметри генератора, а також враховано активно-ємнісний характер навантаження генератора при ІБР.

Метою роботи є дослідження шляхом моделювання сумісної роботи джерела імпульсної напруги з розрядною камерою за умови врахування паразитних елементів розрядного кола.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Електрична схема та результати досліджень

На рис. 1,а зображено схему заміщення імпульсного генератора (ІГ), навантаженого на розрядну камеру (РК) з діелектричним бар'єром, де C_1 – конденсатор, який заряджається від високовольтного джерела постійного струму; K – ключ; L_1 – індуктивність, яка виконує роль індуктивного накопичувача енергії; VD – SOS-діод; L_2 – паразитна індуктивність діоду; R_1 – опір, який включає активні опори ключа K та індуктивності L_1 . До електричної схеми РК входять такі елементи: C_2 – ємність бар'єра; C_3 ; R_2 – ємність та нелінійний опір газового розрядного проміжку; L_3 – паразитна індуктивність розрядної камери.

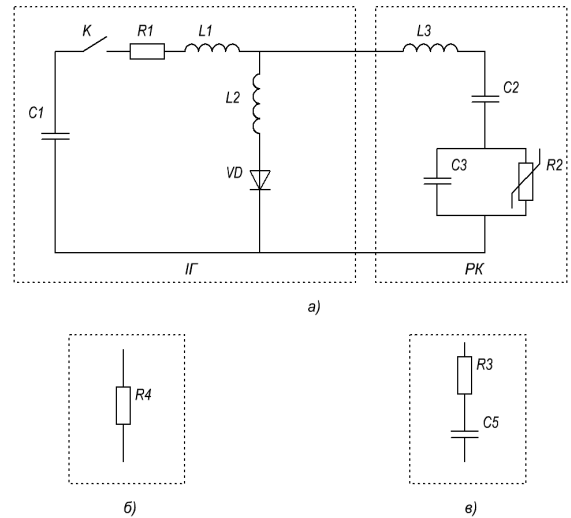


Рисунок 1 – Схема заміщення генератора:
а) розрядна камера з бар'єрним розрядом;
б) активне навантаження;
в) активно-ємнісне навантаження

Генератор імпульсів працює наступним чином. Конденсатор C_1 , попередньо заряджений до напруги U_0 , після замикавання ключа K спочатку перезаряджається через індуктивності L_1 , L_2 та діод VD . Після того, як конденсатор перезарядиться, струм у колі змінює напрям і протягом певного часу діод не впливає на його проходження. За цей час у L_1 накопичується індуктивна енергія, після чого за рахунок відновлення зворотного опору діода струм починає стрімко обриватися. За рахунок цього на діоді виникає високовольтний імпульс напруги, який прикладається до навантаження. Розгорнуте пояснення принципу роботи такого генератора міститься у роботі [4].

Складність моделювання сумісної роботи генератора з розрядною камерою полягає в тому, що опір R_2 під час ІБР має нелінійний характер, тому це обумовило те, що для налаштування моделі генератора спочатку моделювання виконувалось для лінійного активного навантаження (рис. 1,б). Такий варіант навантаження також дозволив більш точно визначити поведінку діоду, який має досить складну модель із багатьма параметрами.

У фізичному експерименті як ключ використовувався газонаповнений розрядник РУ-62, як VD – SOS-діоди HFA30PB120 (поєднано включено 36 одиниць). Велика кількість послідовно включених діодів зумовила помітну величину паразитної індуктивності L_2 , яка, за оцінками з фізичного експерименту, складала величину біля 0,8 мкГн. Для запису осцилограм струму через розрядну камеру $i_n(t)$ та загальної напруги $u_n(t)$ на РК використовувалися прилади фірми Tektronix: осцилограф TDS1012, датчик струму P6021 та подільник напруги P6015.

Моделювання проведено у програмному середо-

вищі Simulink Matlab. Параметри схеми відповідали умовам фізичного експерименту та мали наступні значення: $C_1=1756$ пФ, заряджений до $U_0=25$ кВ; $R_1= 10$ Ом; $L_1=5,3$ мкГн; $L_2=0,8$ мкГн; $L_3=0,1$ мкГн; $R_4= 198$ Ом. Порівняння результатів експерименту з моделюванням надано на рис. 2, де зображено розраховані (суцільні лінії) та експериментальні (пунктир) осцилограми. При цьому криві 1 і 2 відповідають струму через SOS-діод $i_o(t)$ та криві 3 й 4 – напрузі на навантаженні $u_n(t)$.

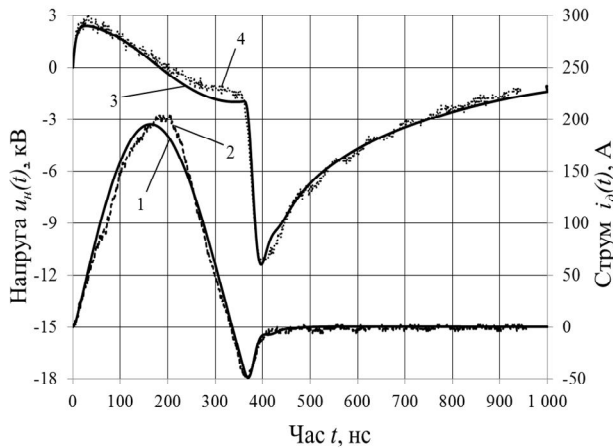


Рисунок 2 – Осцилограми струму через SOS-діод $i_o(t)$ та напруги на ньому $u_n(t)$ при активному навантаженні $R_4=198$ Ом

З рис. 2 видно, що розрахункова осцилограма напруги співпадає з експериментальною як за амплітудою, так і за формою імпульсу. Експериментальні та розрахункові осцилограми струму через SOS-діод теж майже співпадають (спостерігається лише невелика розбіжність між амплітудами прямого струму через SOS-діод, яка не перевищує 5 %).

Наступним етапом перевірки адекватності моделювання став аналіз роботи генератора з активно-ємнісним навантаженням (рис. 1,в). При розрахунках також враховувалося, що послідовно з цим навантаженням включена індуктивність L_3 , яка віддзеркалює паразитну індуктивність ($\sim 0,1$ мкГн), що була присутня у фізичному експерименті.

На рис. 3 показано розраховані (суцільні лінії) та експериментальні (пунктир) осцилограми при активно-ємнісному навантаженні (криві 1, 2 – струм через навантаження $i_n(t)$, криві 3, 4 – напруга на ньому $u_n(t)$). Значення параметрів схеми для моделювання: $C_1=1756$ пФ; $U_0=25$ кВ; $R_1= 10$ Ом; $L_1=5,3$ мкГн; $L_2=0,8$ мкГн; $L_3=0,1$ мкГн; $C_5=2345$ пФ; $R_3= 90$ Ом. Наведені параметри відповідали умовам фізичного експерименту. З рис. 3 видно, що досягається майже повне співпадіння між амплітудами імпульсів струмів і напруг та їх тривалості, але залишається незначна розбіжність на початках імпульсів, яка, вірогідно, є результатом неврахованих нелінійного опору розрядника та паразитних елементів електричної схеми.

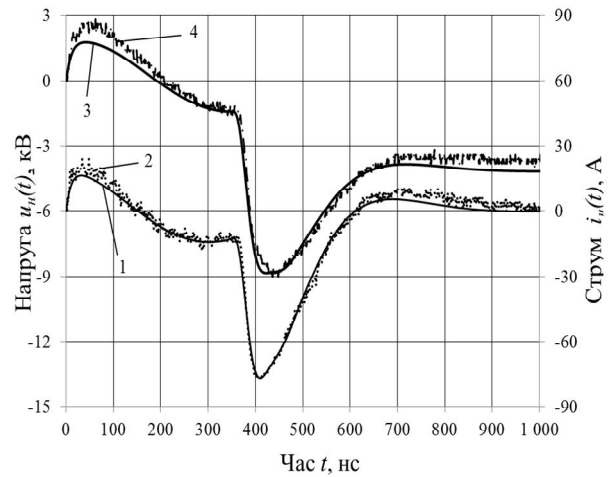


Рисунок 3 – Осцилограми струму через навантаження та напруги на ньому (при активно-ємнісному навантаженні $R_3=90$ Ом; $C_5=2345$ пФ)

Завершальним етапом перевірки достовірності моделювання були обчислення вихідних параметрів генератора навантаженого газорозрядною камерою з діелектричним бар'єром. Таке навантаження має складну нелінійну характеристику опору газового розрядного проміжку R_2 , тому в роботі моделювання виконувалося для дещо спрощеного варіанта, коли опір R_2 приймався незмінною величиною, яка знаходиться в діапазоні значень $R_2 = 10^0-10^3$ Ом, характерних для ІБР. Моделювання проведено при наступних параметрах схеми: $C_1=690$ пФ; $U_0=23$ кВ; $R_1=10$ Ом; $L_1=5,3$ мкГн; $L_2=0,8$ мкГн; $L_3=0,1$ мкГн; $C_2=590$ пФ; $C_3=180$ пФ; $R_2 = 85$ Ом. Ці параметри відповідали умовам фізичного експерименту, який проводився для перевірки достовірності моделювання. Значення ємностей діелектричного бар'єру C_2 та газового проміжку C_3 відповідали параметрам РК, що використовувалася в експерименті. Величина C_2 вимірювалася при заповненні РК електролітом, C_3 – обчислювалась, виходячи з геометричних параметрів газового проміжку РК. Значення $R_2 = 85$ Ом відповідало величині імпедансу РК під час дії ІБР.

Результати моделювання та їх порівняння з експериментальними даними показано на рис. 4, де зображено розраховані (суцільні лінії) та експериментальні (пунктир) осцилограми (криві 1 і 2 для $i_n(t)$, криві 3 і 4 – для $u_n(t)$). З рис. 4 видно, що амплітудних значень напруги ($U_n \approx 13$ кВ) та струми ($I_n \approx 120$ А) досягають у момент $t \approx 300$ нс, а довжина цих імпульсів на половині їх амплітудних величин становить близько 100 нс. З рис. 4 також видно, що коли починається ІБР ($t \approx 250$ нс), розрахункові та експериментальні значення струму та напруги майже співпадають. Але є деякі розбіжності між розрахунковими та експериментальними кривими, які спостерігаються на початках та на "хвостах" імпульсів. Це можна пояснити неврахованими нелінійним опором розрядника та розрядної камери, які для спрощення при моделюванні замінено активними опорами.

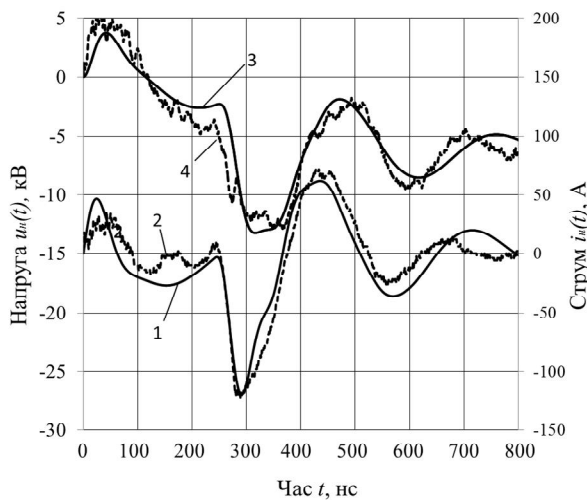


Рисунок 4 – Осцилограми струму через РК $i_n(t)$ та напруги $u_n(t)$ на РК при $R_2 = 85$ Ом

У цілому моделювання показало задовільні результати, що дозволяє визначати оптимальні параметри елементів схеми генератора та скоротити час на проведення експериментів.

У роботі [4] досліджувались характеристики вихідного імпульсу струму та напруги на навантаженні. Було показано, що вони суттєво залежать від співвідношення параметрів елементів розрядного кола, до якого входить SOS-діод. Також було встановлено, що величина індуктивності у розрядному колі повинна становити $L_1 = 5\text{--}10$ мкГн при $C_1 = 700$ пФ. За таких умов ефективність передачі енергії від первинного накопичувача енергії C_1 до активного навантаження може досягати 70 %. Але для дослідження сумісної роботи генератора з розрядною камерою з ІБР потрібно детальніше дослідити вплив елементів схеми заміщення бар'єрного розряду на роботу генератора.

Права частина рис. 1,а відповідає схемі заміщення навантаження генератора, яким є розрядна камера з бар'єрним розрядом: C_2 і C_3 – ємності діелектрика та газового розрядного проміжку відповідно; R_2 – опір розрядного проміжку, який у процесі розряду змінюється нелінійно. Кожен із перелічених елементів РК залежить від її конструктивного виконання, типу діелектрика, що використовується як бар'єр, та газу, яким наповнена розрядна камера.

Ємності газового проміжку та бар'єру розраховуються за виразом

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (1)$$

де ϵ_0 – діелектрична стала вакууму; ϵ – діелектрична проникність середовища; S – площа діелектрика; d – товщина діелектрика.

Газу мають низьку молекулярну густину, і їх діелектрична проникність незначно перевищує оди-

ницю й не залежить ні від температури, ні від частоти напруги у всьому діапазоні частот, тому вплив газу на ємність газового проміжку незначний. А для ємності діелектрика, який виконує функцію бар'єру у розрядній камері, величина діелектричної проникності значно більша. Величина ϵ для діелектриків може сягати сотень тисяч. Але зазвичай у дослідницьких установках, із міркувань однорідності та ефективності розряду, вона знаходиться в діапазоні від чотирьох до 20. Наприклад, для скла ϵ може складати від чотирьох до дев'яти, а для кераміки – від 10 до 20.

Параметри S та d у виразі (1) також мають визначальний вплив на величину ємності, тобто ємність залежить від геометричних розмірів розрядної камери. З урахуванням того, що розрядні камери зазвичай мають деякі нерозбірні частини після збірки, то змінити ці параметри складно, а іноді взагалі неможливо, виготовити ж бар'єри з різними діелектричними ємностями – завдання значно простіше. Цього можна досягти завдяки відповідному вибору при проектуванні РК геометричних параметрів, матеріалу діелектричного бар'єру та величини газового проміжку в ній. Тому для розробки розрядної камери було б доцільно дослідити вплив ємності діелектрика C_2 та ємності газового проміжку C_3 на амплітуди вихідних імпульсів струму через РК та напруги на ній.

Розглянемо, як змінюються величини амплітуди напруги на РК та струму через неї за умови зміни ємності C_2 від 0,1 до 3 нФ при наступних параметрах схеми: $C_1=690$ пФ; $U_0=23$ кВ; $R_1= 10$ Ом; $L_1=5,3$ мкГн; $L_2=0,8$ мкГн; $L_3=0,1$ мкГн; $C_3=180$ пФ; $R_2= 85$ Ом.

На рис. 5 зображено криві напруги на РК (крива 1) та струму через неї (крива 2) залежно від величини ємності C_2 . Видно, що зі збільшенням ємності бар'єру напруга на РК стрімко знижується. Найбільші амплітуди напруг на РК досягаються при малих ємностях бар'єру: при $C_2 = 100$ пФ $U_m \sim 22$ кВ. Але при такій ємності амплітудні значення струму найменші: $I_m \sim 60$ А.

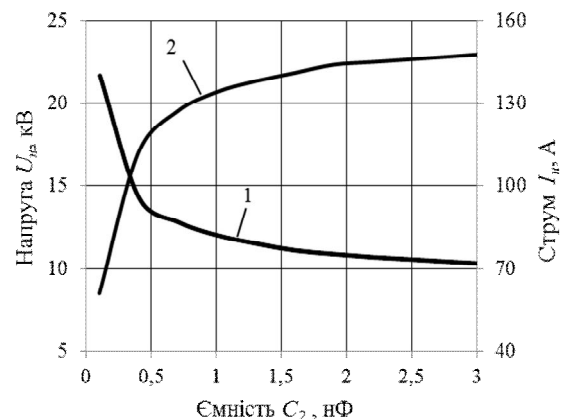


Рисунок 5 – Амплітуди струму через РК та напруги на ній залежно від ємності бар'єру C_2

Амплітудне значення струму через РК, навпаки, стрімко зростає зі збільшенням величини ємності C_2 від 100 до 500 пФ і досягає при 500 пФ ~ 120 А. Після цього зростання стає значно повільнішим. Зростання струму майже припиняється при значеннях ємності більше 3 нФ, при цьому амплітуда струму досягає близько 150 А. Напруга на РК, навпаки, стрімко спадає з підвищенням величини ємності від 100 до 500 пФ та складає ~ 13 кВ. Після подальшого збільшення значення ємності вона продовжує знижуватися й досягає значення близько 10 кВ при $C_2 = 3$ нФ. Збільшення ємності понад 3 нФ не дає помітних змін в амплітуді напруги. Проаналізувавши рис. 5, можна зробити висновок, що для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом доцільно обирати ємність бар'єру в діапазоні 300–500 пФ. За такими значеннями ємності C_2 можна отримувати високі значення амплітуд як струму, так і напруги одночасно.

Для дослідження впливу ємності газового проміжку на амплітуди імпульсів струму через РК та напруги на ній було проведено моделювання з наступними прийнятими параметрами кола: $C_1=690$ пФ; $U_0=23$ кВ; $R_1=10$ Ом; $L_1=5,3$ мкГн; $L_2=0,8$ мкГн; $L_3=0,1$ мкГн; $C_2=590$ пФ; $R_2 = 85$ Ом; ємність C_3 – змінювалась у діапазоні від 10 пФ до 2 нФ. На рис. 6 надана залежність амплітуд струму через РК (крива 2) та напруги на ній (крива 1) від величини ємності газового проміжку. При ємності $C_3=10$ пФ максимальна величина напруги $\sim 13,8$ кВ. Напруга стрімко падає зі збільшенням ємності до величини близько 400 пФ і складає $U_m \approx 12,3$ кВ. Після досягнення ємності ~ 2 нФ і більше амплітудне значення напруги складає близько 11,5 кВ і вона перестає впливати на нього. Амплітудне значення струму, яке при $C_3=10$ пФ складає ~ 80 А, плавно зростає з підвищенням величини ємності та досягає максимуму ~ 200 А при $C_3 \sim 2$ нФ. Подальше підвищення величини ємності не призводить до змін струму.

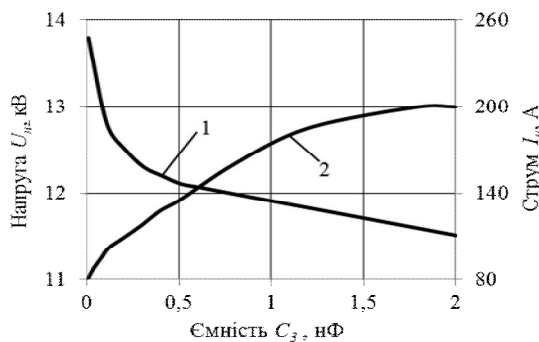


Рисунок 6 – Амплітуди струму через РК та напруги на ній залежно від ємності газового проміжку

Зазвичай обробка води імпульсним бар'єрним розрядом у дослідницьких установках проводиться при енергіях імпульсів від десятків до декількох

сотень мДж [8]. Досягнення таких енергій залежить від напруги U_0 або (та) ємності C_1 у схемі (рис. 1,а). Крім цього, енергія, що виділяється в навантаженні, залежить від його параметрів. Одним з найважливіших показників генератора імпульсів є коефіцієнт передачі енергії, який визначається за виразом

$$\eta = \frac{W_{R_2}}{W_C} 100\% , \quad (2)$$

де $W_C = (CU_0^2) / 2$ – енергія, накопичена в конденсаторі C_1 ; W_{R_2} – енергія, яка передана у навантаження R_2 за час дії імпульсу струму t , що проходить через опір R_2 ,

$$W_{R_2} = \int_0^t \frac{u_{R_2}^2(t)}{R_2} dt , \quad (3)$$

де $u_n(t)$ – напруга на R_2 .

Для дослідження зміни коефіцієнту передачі енергії залежно від активного опору РК під час ІБР було проведено моделювання з раніше прийнятими параметрами схеми $C_1=690$ пФ; $U_0=23$ кВ; $R_1= 10$ Ом; $L_1=5,3$ мкГн; $L_2=0,8$ мкГн; $L_3=0,1$ мкГн; $C_2=590$ пФ; $C_3=180$ пФ. Величина R_2 змінювалась у характерному для ІБР діапазоні від 1 до 10^3 Ом. З рис. 7 видно, що зі збільшенням опору R_2 коефіцієнт η спочатку стрімко зростає й досягає максимуму $\eta \approx 35\%$ при $R_2 \approx 100$ Ом.

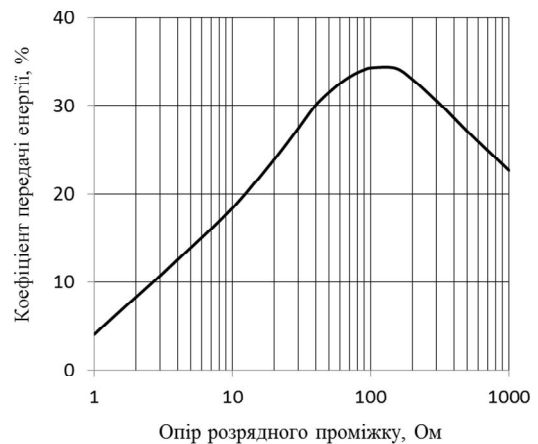


Рисунок 7 – Залежність коефіцієнта передачі енергії η від опору розрядного проміжку R_2

Збільшення опору понад 150 Ом призводить до помітного зниження цього показника, тому можна зробити висновок, що для забезпечення найвищого коефіцієнта передачі енергії доцільно створювати розрядну камеру, імпеданс якої під час ІБР знаходиться в межах від 100 до 150 Ом. Однак слід зауважити, що на ці оптимальні значення опору R_2 , як показали дослідження [4, 5], суттєво впливає весь комплекс параметрів генератора імпульсів та його навантаження. Тому при розробці найбільш ефективного генератора це треба брати до уваги.

ВИСНОВКИ. Моделювання генератора імпульсів з індуктивним накопичувачем енергії, який комутується SOS-діодом, з навантаженням у вигляді розрядної камери, що містить діелектричний бар'єр, дало результати, які задовільно співпадають із даними фізичного експерименту. Це дозволить у майбутньому при відомих параметрах розрядної камери (ємностях діелектричного бар'єру та газового проміжку, імпедансу при дії імпульсного бар'єрного розряду) шляхом моделювання визначити оптимальні параметри елементів генератора імпульсів.

Для отримання найбільш ефективної та економічної роботи генератора імпульсів характеристики генератора та розрядної камери повинні бути узгодженими. Цього можна досягти завдяки відповідному вибору геометричних параметрів розрядної камери та матеріалу діелектричного бар'єру. Досягнення найбільшого коефіцієнта передачі енергії від генератора до навантаження імпеданс розрядної камери повинен знаходитися в певному діапазоні (~ 100–150 Ом). Для розрядних камер з імпедансом, що виходить за ці межі, до генератора доцільно вводити узгоджувальний імпульсний трансформатор між ним та камерою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Malik Muhammad Arif. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? // *Plasma chemistry and plasma processes*. – 2010. – Iss. 30. – PP. 21–31.
2. Takaki K., Kanesawa K., Mukaigawa S. and others. Energy efficiency of corona discharge reactor driven by inductive energy storage system pulsed power generator // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2007. – Iss. 14/2007 (4). – PP. 834–845.
3. Zheng Niu, Cheng Zhang, Tao Shao and others. Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers // *Surface & Coatings Technology*. – 2012. – Iss. 228. – PP. 578–582.
4. Божко І.В., Кобильчак В.В. Джерело живлення для імпульсних електророзрядних технологій обробки води // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – Вип. 3. – С. 27–35.
5. Sugai Taichi, Liu Wei, Tokuchi Akira and others. Influence of a circuit parameter for plasma water treatment by an inductive energy storage circuit using semiconductor opening switch // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2013. – Iss. 41/2013 (4). – PP. 967–974.
6. Magureanu Monica, Piroi Daniela, Bogdan Mandache Nicolae, Parvulescu Vasile. Decomposition of methylene blue in water using a dielectric barrier discharge: optimization of the operating parameters // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – Iss. 104. – PP. 103–306.
7. Tie Cheng Wang, Na Lu, Jiu Tao An, Yan Zhao Jie Li, Yan Wu. Multi-tube parallel surface discharge plasma reactor for wastewater treatment // *Separation and Purification Technology*. – 2012. – Iss. 100. – PP. 9–14.
8. Mankowski John, Kristiansen Magne. A review of short pulse generator technology // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2000. – Iss. 28/2000 (1). – PP. 102–108.
9. Меерович Л.А., Ватин И.М., Зайцев Э.Ф., Кандыкин В.М. Магнитные генераторы импульсов. – М.: Советское радио, 1968. – 475 с.
10. Рукин С.Н. Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока // *Приборы и техника эксперимента*. – 1999. – Вып. 4. – С. 5–36.
11. Васильев П.В., Любутин С.К., Педос М.С. и др. Наносекундный SOS-генератор с частотой следования импульсов 20 кГц // *Приборы и техника эксперимента*. – 2010. – Вып. 6. – С. 62–67.

THE GENERATOR OF SHORT HIGH-VOLTAGE PULSES WITH INDUCTIVE ENERGY STORAGE WHICH IS COMMUTED BY SOS-DIODE

I. Kondratenko, I. Bozhko, V. Kobylchak

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Science of Ukraine
prosp. Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine. E-mail: vladimirkobylchak@gmail.com

Using pulse electro-discharge technologies, including pulsed barrier discharge can achieve high performance in purification of water from contaminating organic matters. To create an effective discharge, power sources of high-voltage pulses (10–30 kV) with steep fronts 10^{11} – 10^{12} V/s which length is 100–200ns are required. These parameters of pulse power supply can be achieved by using inductive energy storage which is commuted by SOS-diode. In practice, to implement effective joint operation of the power supply and the load which is like a discharge chamber with a non-linear active – capacitive nature during the pulsed barrier discharge is a difficult task. That's why, it was implemented a simulation of pulse generator loaded into a discharge chamber, which is conducting a barrier discharge, and including parasitic elements of the discharge circuit. The reliability of the simulation was verified by comparing results with physical experiments. This makes it possible to determine the optimal parameters of the generator and the discharge chamber through simulation. It was determined the value for impedance of discharge chamber with a pulsed barrier discharge in which the rate of energy transfer from the pulse generator to them will be the greatest. This value of impedance discharge chamber is in a certain range of (~ 100–150 Ohm). For discharge chambers with impedance that is beyond these limits it is reasonable to attach the pulse transformer to the generator between it and the chamber.

Key words: pulse generator, SOS-diode, pulse barrier discharge.

REFERENCES

1. Malik, Muhammad Arif. (2010), "Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient?", *Plasma chemistry and plasma processes*, Vol. 30, pp. 21–31.
2. Takaki, K., Kanesawa, K., Mukaigawa, S., Fujiwara, T. and Go, T. (2007), "Energy efficiency of corona discharge reactor driven by inductive energy storage system pulsed power generator", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, no. 4, pp. 834–845.
3. Zheng, Niu, Cheng, Zhang, Tao, Shao, Zhi, Fang, Yang, Yu and Ping, Yan (2012), "Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 228, pp. 578–582.
4. Bozhko, I.V. and Kobylchak, V.V. (2014), "Power supply for pulse electric discharge technology in water treatment", *Tekhnichna elektrodynamika*, Vol. 3, pp. 27–35. (in Ukrainian)
5. Sugai, Taichi, Liu, Wei, Tokuchi, Akira, Jiang, Weihua and Minamitani, Yasushi (2013), "Influence of a circuit parameter for plasma water treatment by an inductive energy storage circuit using semiconductor opening switch", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 41, no. 4, pp. 967–974.
6. Magureanu, Monica, Piroi, Daniela, Mandache, Nicolae Bogdan and Parvulescu, Vasile (2008), "Decomposition of methylene blue in water using a dielectric barrier discharge: Optimization of the operating parameters", *Journal of Applied Physics*, Vol. 104, pp. 103–306.
7. Tie, Cheng Wang, Na, Lu, Jiu, Tao An, Yan, Zhao Jie Li and Yan, Wu (2012), "Multi-tube parallel surface discharge plasma reactor for wastewater treatment", *Separation and Purification Technology*, Vol. 100, pp. 9–14.
8. Mankowski, John and Kristiansen, Magne (2000), "A review of short pulse generator technology", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 28, no. 1, pp. 102–108.
9. Meerovitch, L.A., Vatin, I.M., Zaitsev, E.F. and Kandykin, V.M. (1968), *Magnitnyye generatory impulsov* [Magnetic pulse generators], Sovetskoye radio, Moscow. (in Russian)
10. Roukin S.N. (1999), "Generators of powerful nanosecond pulses with semiconductor opening switch", *Pribory i tekhnika eksperimenta*, Vol. 4, pp. 5–36. (in Russian)
11. Vasiliev, P.V., Lyubutin, S.K., Pedos, M.S., Ponomarev, A.V., Roukin, S.N., Slovikovsky, B.G., Timoshenko, S.P. and Cholah, S.O. (2010), "Nanosecond SOS-generator with a pulse repetition rate of 20 kHz", *Pribory i tekhnika eksperimenta*. Vol. 6, pp. 62–67. (in Russian)

Стаття надійшла 10.09.2014.