

**ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ІМПУЛЬСНИХ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ВОДИ****І.В.Божко, канд.техн.наук, В.В.Кобильчак****Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.
e-mail: vladimirkobylchak@gmail.com**

Виконано моделювання генератора високовольтних коротких імпульсів з вторинним індуктивним накопичувачем енергії, який комутується SOS-діодом. Досліджено вплив R,L,C-параметрів розрядного кола генератора і опору навантаження на характеристики вихідного імпульсу напруги (амплітуду, тривалість фронту та самого імпульсу) та коефіцієнту передачі енергії від первинного накопичувача енергії (конденсатора) до навантаження. Визначено оптимальні значення елементів схеми, за яких характеристики генератора стають припустимими (крутизна фронту імпульсу біля $2 \cdot 10^{11}$ В/с та тривалість імпульсу порядку 100 нс) для його використання в імпульсних електророзрядних технологіях обробки води. Результати розрахунків підтверджуються проведеними експериментальними дослідженнями. Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова: імпульсний генератор, індуктивний накопичувач енергії, SOS-діод, імпульсний розряд.

Питна, технічна та стічна вода потребують очистки, тому є нагальна необхідність удосконалення відомих та створення нових методів обробки. Аналіз сучасної літератури свідчить, що серед відомих методів обробки одними з перспективних є електророзрядні методи [7], серед яких чільне місце займає обробка імпульсними розрядами [5,7,8]. Це пов'язано з тим, що обробка на імпульсних розрядах більш ефективна у порівнянні з обробкою на постійному струмі. В імпульсних електророзрядних технологіях використання розряду на поверхню води у порівнянні з різними видами підводних розрядів є більш доцільним, бо для нього набагато менші питомі енергозатрати [7] та значно більший ресурс електродних систем. Для створення такого розряду потрібні джерела живлення високовольтних (20–30 кВ) імпульсів з крутизою фронтів 10^{11} – 10^{12} В/с, довжина яких складає 100–200 нс [7]. Частота слідування цих імпульсів повинна бути $10 \dots 10^3$, а енергія – $0,01 \dots 1$ Дж. Імпульсні генератори відрізняються схемними рішеннями та типами ключів, які в них використовуються. Побудова імпульсного генератора залежить від методу накопичення енергії, який, в свою чергу, може бути ємнісний або індуктивний. В ролі ключів у таких генераторах найбільш поширеними є розрядники, напівпровідникові ключі (тиристори, транзистори та інші), а також магнітні ключі [4,10].

Використання розрядників дозволяє отримувати короткі імпульси, але вони мають ряд недоліків, головні з яких – обмежений ресурс роботи та значний розкид величин напруги їхнього спрацьовування [1]. Тиристори та транзистори у порівнянні з розрядниками при номінальних навантаженнях мають незрівнянно більший ресурс роботи. Але вони не дозволяють отримувати короткі імпульси з довжиною порядку 100 нс та амплітудою в десятки кВ [2,4].

Перспектива за магнітними ключами, які працюють за принципом магнітного стискання імпульсу [3,4,10]. Разом з тим отримати імпульс довжиною у десятки наносекунд за допомогою лише магнітного стискання доволі складно. Для цього потрібно декілька ступенів стискання, що ускладнює та зменшує коефіцієнт корисної дії джерела живлення. Цю проблему можна вирішити шляхом встановлення в останніх каскадах генератора імпульсів на магнітних ключах SOS-діодів, час відновлення яких менше, ніж 100 нс. Імпульсний генератор з індуктивним накопичувачем енергії класифікується як підсилювач напруги, яка виникає завдяки швидкому розмиканню ланцюга струму за допомогою SOS-діода [2].

Останнім часом з'явився ряд експериментальних робіт, у яких розглядається використання SOS-діодів у генераторах імпульсів [2,6,8,9]. 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 стосуються 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. Тому метою даної роботи було

моделювання імпульсного генератора та дослідження впливу зміни параметрів кола на вихідні характеристики генератора, а також визначення умов, за яких він забезпечує високовольтні імпульси з амплітудою до 30 кВ, з фронтами не більше 50 нс та довжиною близько 100 нс, тобто з параметрами, які потрібні для створення ефективного імпульсного бар'єрного розряду [7].

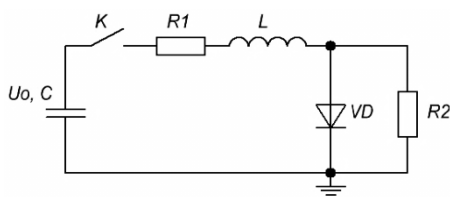


Рис. 1

користувалися при розрахунках, не перевищував 0,3 Ом.

Схема працює наступним чином. Конденсатор C , попередньо заряджений до напруги U_0 , після замикання ключа K спочатку за час T_n , рис. 2 (крива 1), перезаряджається через індуктивність L та діод VD .

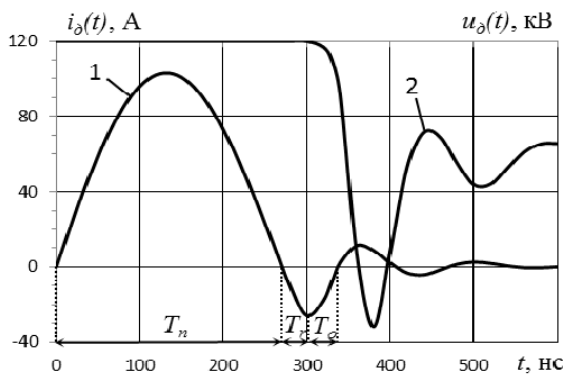


Рис. 2

Після того як конденсатор перезарядиться, струм змінює напрямок у колі і протягом часу T_r діод не впливає на його проходження. За цей час в L накопичується індуктивна енергія і за рахунок відновлення зворотного опору діода струм починає обриватися. Час цього обривання складає T_o . Після цього на діоді виникає високовольтний імпульс напруги, який прикладається до навантаження R_2 , рис. 2 (крива 2). Виникнення такого імпульсу пояснюється наступним чином. Використовуючи другий закон Кірхгофа, складемо рівняння

$$u_c = L \frac{di_1}{dt} + u_\phi + i_1 R_1, \quad (1)$$

де u_c – напруга на конденсаторі, u_ϕ – напруга на діоді, i_1 – струм через опір R_1 .

З виразу (1) знаходимо

$$u_\phi = -L \frac{di_1}{dt} + u_c - i_1 R_1. \quad (2)$$

При перезаряджанні конденсатора за час T_n , коли струм через діод протікає в прямому напрямку, внутрішній опір діода незначний і $u_\phi \approx 0$. Після перезаряджання конденсатора струм змінює напрямок, але деякий час ($T_r \approx 30 \dots 40$ нс) діод, як і раніше, продовжує пропускати струм, маючи при цьому незначний опір. Тому протягом цього часу величина u_ϕ також мала. Але ця ситуація змінюється, коли діод починає закриватися. При цьому струм через діод i_ϕ починає зменшуватися і величина похідної di_1/dt у виразі (2) наростає, а її знак змінюється з позитивного на негативний. Тому для проміжку часу $(T_n + T_r) < t < (T_n + T_r + T_o)$ вираз (2) набуває виду

$$u_\phi = L \frac{di_1}{dt} + u_c - i_1 R_1. \quad (3)$$

При цьому напруга на індуктивності та ємності підсумовуються. Тому для цього проміжку часу за абсолютною величиною $u_\phi \gg 0$.

На рис. 2 показані результати моделювання залежності від часу t струму через діод $i_\phi(t)$ (крива 1) та напруги $u_\phi(t)$ (крива 2) на ньому. Розрахунки виконано у програмному середовищі Місго-Сар при параметрах $C=700$ пФ, $U_0=13,5$ кВ, $L=10$ мкГн, що були характерними для попередніх досліджень [5,6,9] і стосувалися розробки генераторів для живлення імпульсного коронного розряду. Для того, щоб на першому етапі моделювання відійти від імпедансу розрядної камери, який зазвичай лежить в широкому діапазоні значень (50...10000 Ом), величина R_2 була прийнята рівною 1000 Ом. Вважалося, що $R_1 = 10$ Ом. При моделюванні параметрами SOS-діоду слугували дані моделі для діоду SKR31F12, яких було послідовно під'єднано 30 одиниць. На цьому рисунку видно, що амплітуда імпульсу напруги на навантаженні U_ϕ становить 19 кВ. Це у порівнянні з напругою U_0 у півтора рази більше. При

довжині фронту імпульсу $T_\phi \approx 45$ нс його довжина T_{50} складає ≈ 70 нс. За величину T_ϕ приймався час, за який імпульс досягав 90% від амплітудного значення U_ϕ . T_{50} – величина, яка визначає довжину імпульсу на половині його амплітудного значення (у зарубіжній літературі поширене скорочення цього терміну FWHM (Full-wide-half-maximum)). Таким чином крутизна фронту імпульсу дорівнює $\Delta u/\Delta t \approx \approx 2 \cdot 10^{11}$ В/с, що є прийнятним для ефективного використання імпульсного бар’єрного розряду. Моделювання показало, що напруга U_ϕ майже лінійно залежить від напруги заряду конденсатора U_0 . Наприклад, при $U_0 = 27$ кВ $U_\phi = 37$ кВ. Тому всі подальші розрахунки виконано при одній і тій самій напрузі $U_0 = 13,5$ кВ, вважаючи що за необхідністю вихідну напругу на навантаженні можна підвищити за рахунок збільшення величини U_0 .

Важливими показниками генератора імпульсів, крім параметрів U_ϕ , T_ϕ та T_{50} , є також коефіцієнт передачі енергії, який визначається за формулою

$$\eta = \frac{W_{R_2}}{W_C} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де $W_C = (C \cdot U_0^2) / 2$ – накопичена енергія в конденсаторі C , W_{R_2} – енергія, яка передана у навантаження R_2 за весь час t дії імпульсу струму, що проходить через опір R_2 ,

$$W_{R_2} = \int_0^t \frac{u_\phi^2(t)}{R_2} dt. \quad (5)$$

Результати попередніх робіт [5,6,8] та попереднього моделювання показали, що параметри генератора імпульсів суттєво залежать від індуктивності, прийнятними значеннями якої є L до 40 мкГн. Тому, щоб визначитися з оптимальними параметрами L , було проведено моделювання ($C=700$ пФ, $R_1=10$ Ом, $R_2=1000$ Ом) при індуктивностях у діапазоні від 0,5 мкГн до 40 мкГн.

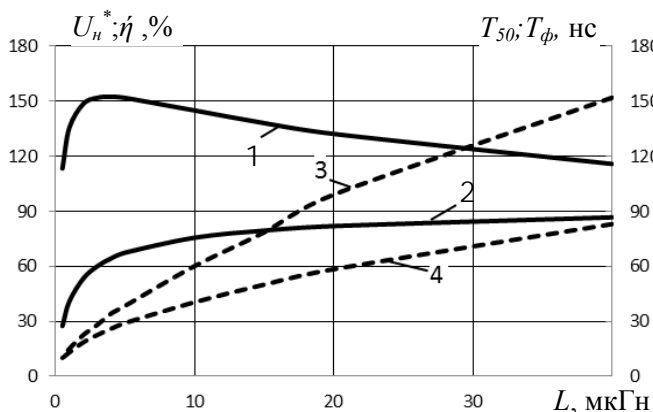


Рис. 3

На рис. 3 показано залежності відносної напруги U_n^* на навантаженні R_2 (крива 1), яка визначалася за виразом

$$U_n^* = \frac{U_n}{U_0} \cdot 100\%, \quad (6)$$

коефіцієнту η (крива 2) та величин T_ϕ , T_{50} (криві 4 та 3 відповідно) від значення L . З рисунку видно, що при зростанні L напруга U_n^* досягає максимуму при $L \approx 5$ мкГн, а подальше збільшення індуктивності її зменшує. Коефіцієнт η також стрімко підвищується зі збільшенням індуктивності до 5 мкГн, але в подальшому темп його наростання значно менший. З ростом індуктивності довжини імпульсу на-

пруги T_{50} збільшується від 10 нс до 150 нс, а його фронту T_ϕ – від 10 нс до 90 нс.

Показані на рис. 3 залежності дозволяють встановити параметри індуктивності L , за яких величини U_n^* , η , T_ϕ , та T_{50} є прийнятними. Вони лежать у діапазоні від 5 до 10 мкГн. За цих умов $T_\phi < 50$ нс, $T_{50} < 60$ нс, $U_n^* \approx 140\%$, $\eta \approx 75\%$, що є прийнятними умовами використання такого джерела живлення для створення ефективного імпульсного бар’єрного розряду.

Величина C також має суттєвий вплив на вихідні параметри генератора імпульсів. Перш за все треба враховувати, що ця ємність є первинним накопичувачем енергії і від неї залежить енергія, яка передається до навантаження за час проходження імпульсу. Цю енергію, зазвичай, не збільшуючи величину C , можна збільшувати за рахунок зростання напруги U_0 . Але з технологічних та практичних міркувань це не завжди доцільно. Тому було б бажаним досягти потрібного технологічного результату завдяки вибору величини ємності C з урахуванням комплексу всіх вимог. Розрахунки показали, що зі зміною значень C від 300 до 2100 пФ при індуктивності $L = 10$ мкГн величина η зменшується від 81 до 62%. Найбільше значення $\eta \approx 81\%$ відповідає $C = 300$ пФ. Але при зменшенні C приблизно у 7 разів знижується величина енергії, яку можна передати до навантаження. В той же час слід враховувати, що збільшення C , крім зменшення η , призводить до небажаного зростання часових параметрів T_ϕ та T_{50} . Тому вибір величини C повинен бути зорієнтованим на кінцевий результат – досягнення найбільшої енергоефективності електророзрядної технології обробки води з урахуванням у цілому економічності джерела живлення.

Наступним кроком було визначення впливу опорів R_1 та R_2 на коефіцієнт η та вихідну напругу U_n^* . Моделювання проводилося з параметрами кола $C=700$ пФ, $L=10$ мкГн. Значення величин η (криві 1,4) та U_n^* (криві 2,3) в залежності від опору навантаження R_2 представлені на рис. 4. Для кривих 1, 2 значення опору R_1 відповідає 5 Ом, а для кривих 3, 4 – 10 Ом. При зростанні опору R_2 коефіцієнт η у

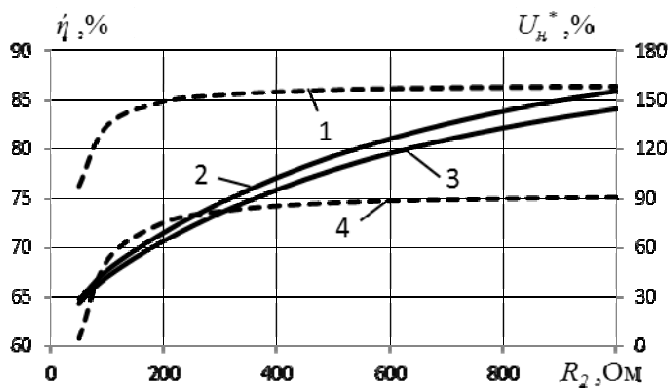


Рис. 4

обох випадках збільшується, але після досягнення величини R_2 близько 200 Ом зміни стають незначними. Щодо вихідної напруги U_n^* , то вона зі збільшенням опору R_2 наростає з 30% до 145–155%. Очевидно, що опір ключа R_1 вимагає особливої уваги, бо навіть при незначному впливі на вихідну напругу U_n^* (криві 2,3), він має значно більший вплив на зміну коефіцієнта η (криві 1,4). При зменшенні опору R_1 з 10 до 5 Ом коефіцієнт η підвищується з 75% до 86% (більше ніж на 10%).

Зрозуміло, що при розробці генератора імпульсів важливими параметрами є не тільки величини U_n^* та η , але й сама величина енергії W_{R_2} , що передається в навантаження. Зазвичай обробка води імпульсним бар'єрним розрядом в дослідницьких установках проводиться при енергіях імпульсів від десятків до 1..2 сотень мДж [7]. Досягнення таких енергій, як вже відзначалося, стає можливим при збільшенні напруги U_0 та ємності C у схемі (рис. 1). Однак при практичному використанні таких джерел живлення в електророзрядних технологіях з економічних та технічних причин обробку води бажано було б вести при напругах U_0 до 20 кВ. Крім цього енергія, що виділяється в навантаженні залежить від його опору. Тому, виходячи з цих обставин, було досліджено вплив величини R_2 на ефективність передачі енергії η та енергію W_{R_2} за умов, коли $U_0=13,5$ кВ. Вибір для цього моделювання величин $L=10$ мкГн, $C=1500$ пФ, $R_1=5$ Ом обумовлений тим, що, як показало попереднє моделювання, при такому співвідношенні цих параметрів можна забезпечити передачу в навантаження енергії >100 мДж. Значення $W_{R_2}=100$ мДж вибрано, як величина, що знаходиться в середині діапазону енергій імпульсу, при яких ведеться обробка води в дослідницьких установках. Результати обчислень за цих умов показані на рис. 5. На ньому зображені залежності величин енергії W_{R_2} (крива 1) та коефіцієнту η (крива 2) від величини опору навантаження R_2 . З рисунку видно, що при зростанні R_2 до 100 Ом значення W_{R_2} та η збільшуються відповідно до 110 мДж та 80%. Подальше зростання R_2 до 4000 Ом майже не впливає на ці величини. З результатів моделювання виходить, що обробку води енергетично вигідно вести при умовах, коли імпеданс розрядних камер досягає 100 Ом і вище. Слід зауважити, що хоча при $R_2 < 100$ Ом параметри генератора погіршуються, їх можна поліпшити за рахунок включення між джерелом живлення та розрядною ка-

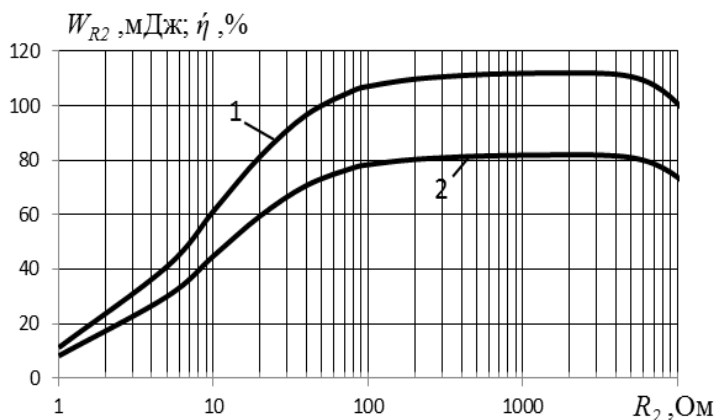


Рис.5

мерою узгоджувального імпульсного трансформатора.

Для перевірки достовірності проведеного моделювання був виконаний фізичний експеримент з наступними параметрами кола: $C=780$ пФ, $U_0=13,5$ кВ, $R_1=5$ Ом, $L=12,5$ мкГн, $R_2=947$ Ом. Як ключ використовувався газонаповнений розрядник РУ-62, як VD – SOS-діоди SKR31F12, яких було послідовно включено 30 одиниць. Для запису осцилограм струму через діоди $i_d(t)$ та загальної напруги $u_d(t)$ на всіх SOS-діодах використовувалися прилади фірми Tektronix: цифровий двоканальний осцилограф TDS1012 з полосною пропускання 100 мГц, датчик струму Р6021 і подільник напруги Р6015. Порівняння результатів експерименту з моделюванням, виконаним при тих самих параметрах кола, показано на рис. 6. На ньому розраховані (суцільні лінії) та експериментальні (пунктир) осцилограми $i_d(t)$, зображені кривими 1 та 2, а осцилограми $u_d(t)$ – 3 та 4. З рисунку видно, що амплітуди прямих струмів

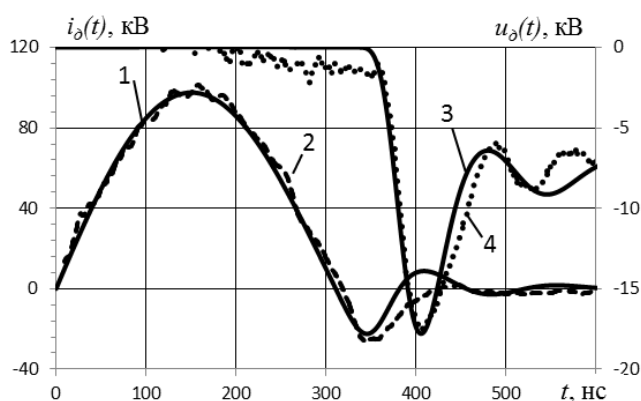


Рис. 6

через діод в обох випадках співпадають і сягають близько 105 А. Амплітуди зворотних струмів до переривання струму також майже співпадають і складають близько 30 А. З осцилограм $u_0(t)$ слідує, що фронти та амплітуди імпульсів напруг також майже співпадають. Деякі розбіжності між розрахунковими та експериментальними кривими спостерігаються на “хвостах” імпульсів. Це можна пояснити неврахованими паразитними ємностями та індуктивностями у розрядному колі, нелінійним опором розрядника, який для спрощення при моделюванні замінено активним опором, а також недосконалістю комп’ютерної моделі.

Висновки. Шляхом моделювання виконано дослідження впливу R, L, C -параметрів з урахуванням початкової напруги ємнісного накопичувача енергії на вихідні характеристики генератора високовольтних коротких імпульсів з індуктивним накопичувачем енергії, у якому як комутуючий елемент використовувався SOS-діод. Показано, що для отримання вихідних імпульсів напруги в десятки кіловольт з крутизою фронту близько $2 \cdot 10^{11}$ В/с та довжиною порядку 100 нс, прийнятними для створення імпульсного бар’єрного розряду, котрий може бути використаний для ефективної обробки води, величина індуктивності у розрядному колі повинна становити $L=5 \dots 10$ мкГн при $C=700$ пФ. За цих умов ефективність передачі енергії від первинного накопичувача енергії (конденсатора) до навантаження може досягати 70%. Збільшити ефективність передачі енергії до 90% можна завдяки збільшенню величини L та зменшенню величини C . Але треба враховувати, що при цьому зменшується вихідна напруга та енергія, що передається до навантаження. Компенсувати таке зниження вихідних параметрів джерела живлення можна (якщо на це є умови) за рахунок підвищення напруги заряду ємнісного накопичувача енергії. Величини активних опорів комутуючого ключа та індуктивності L треба мінімізувати (до значень на рівні одиниць Ом та менше), оскільки їхній вплив на ефективність передачі енергії суттєвий (десятки відсотків). При опорах навантаження $1 \cdot 10^2 \dots 4 \cdot 10^3$ Ом ефективність передачі енергії найбільша (80%) і майже незмінна. При опорах менше, ніж 100 Ом вона стрімко зменшується. Тому обробку води енергетично вигідно вести в розрядних камерах, імпеданс яких перевищує 100 Ом. Для потужних розрядних камер, імпеданс яких менший, доцільно ввести до джерела живлення узгоджувальний імпульсний трансформатор між ним та камерою. Достовірність моделювання підтверджена експериментальними даними.

1. Пичугина М.Т. Мощная импульсная энергетика. – Томск, 2005. – 97 с.
2. Рукин С.Н. Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока // Приборы и техника эксперимента. – 1999. – №4. – С. 5–36.
3. Choi Jaegu. Introduction of the magnetic pulse compressor (mpc) – fundamental review and practical application // Journal of electrical engineering & technology. – 2010. – Vol 5. – №3. – Pp. 484–492.
4. Mankowski John, Kristiansen Magne. A review of short pulse generator technology // IEEE transactions on plasma science. – 2000. – Vol. 28. – № 1. – Pp. 102–108.
5. Takaki K., Kanesawa K., Mukaigawa S., Fujiwara T., Go T. Energy efficiency of corona discharge reactor driven by inductive energy storage system pulsed power generator // IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation. – 2007. – Vol. 14. – №. 4. – Pp. 834–845.
6. Takaki Koichi, Kirihara Hidekazu, Noda Chiharu, Mukaigawa Seiji, Fujiwara Tamiya. Production of an atmospheric-pressure glow discharge using an inductive energy storage pulsed power generator // Plasma Process. Polym. – 2006. – № 3. – Pp. 734–742.
7. Malik Muhammad Arif. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? // Plasma chemistry and plasma processes. – 2010. – № 30. – Pp. 21–31.
8. Sugai Taichi, Liu Wei, Tokuchi Akira, Jiang Weihua, Minamitani Yasushi. 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. – Vol. 41. – № 4. – Pp. 967–974.
9. Yokoo Tomoyuki, Saiki Kunihiko, Hotta Kazuaki, and Jiang Weihua. Repetitive pulsed high-voltage generator using semiconductor opening switch for atmospheric discharge // IEEE transactions on plasma science. – 2008. – Vol. 36. – № 5. – Pp. 2638–2643.

10. Zhang Yu and Liu Jinliang. Nanosecond-range multiple-pulse synchronization controlled by magnetic switches based on a communal magnetic core // IEEE transactions on plasma science. – 2013. – Vol. 41. – № 2. – Pp. 371–379.

УДК 537.523.9+621.373.54

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Божко И.В., канд.техн.наук, **Кобыльчак В.В.**

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: vladimirkobylchak@gmail.com

Проведено моделювання генератора високовольтних коротких імпульсів з вторичним індуктивним накопичувачем енергії, який комутується SOS-діодом. Досліджено вплив R,L,C-параметрів розрядної цепі генератора і опору навантаження на характеристики вихідного імпульсу напруги (амплітуду, довжину фронту і самого імпульсу) і коефіцієнта передачі енергії від первинного накопичувача енергії (конденсатора) к навантаженню. Визначено оптимальні значення елементів схеми, при яких характеристики генератора стануть прийнятними (крутизна фронту імпульсу около $2 \cdot 10^{11}$ В/с, довжина імпульсу порядку 100 нс) для його використання в імпульсних електророзрядних технологіях обробки води. Результати розрахунків підтверджені проведенними експериментальними дослідженнями. Бібл. 10, рис. 6.

Ключевые слова: імпульсний генератор, індуктивний накопичувач енергії, SOS-діод, імпульсний розряд.

POWER SUPPLY FOR PULSE ELECTRIC DISCHARGE TECHNOLOGY IN WATER TREATMENT

Bozhko I.V., Kobylchak V.V.

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. e-mail: vladimirkobylchak@gmail.com

Short pulse high-voltage generator with a secondary inductive energy storage, which is commutating with SOS-diode, was modeled. It was researched an influence of R,L,C-parameters of generator and an resistance of load on the characteristics of the output pulse voltage (amplitude, lengths of the front and of the pulse) and the ratio of energy transfer from the primary energy storage (capacitor) to the load. It was defined the optimal value of elements of circuit in which the characteristics of generator are acceptable (steepness of the front pulse about $2 \cdot 10^{11}$ V/s the pulse length near 100 ns) for use in water treatment technologies by pulse electric discharge. It is shown that the coefficient of energy transmission in a pulse generator may exceed 80%. The calculation results are confirmed by experimental studies. References 10, figures 6.

Key-words: pulse generator, inductive energy storage, SOS-diode, pulse discharge.

1. Pichugina M.T. The pulse power energetics. – Tomsk, 2005. – 97 p. (Rus)
2. Rukin S.N. Nanoseconds pulse power generator with semiconductor current interrupter // Pribory i tekhnika eksperimenta. – 1999. – №4. – Pp. 5–36. (Rus)
3. Choi Jaegu. Introduction of the magnetic pulse compressor (mpc) – fundamental review and practical application // Journal of electrical engineering & technology. – 2010. – Vol 5. – №3. – Pp. 484–492.
4. Mankowski John, Kristiansen Magne. A review of short pulse generator technology // IEEE transactions on plasma science. – 2000. – Vol. 28. – № 1. – Pp. 102–108.
5. Takaki K., Kanosawa K., Mukaigawa S., Fujiwara T., Go T. Energy efficiency of corona discharge reactor driven by inductive energy storage system pulsed power generator // IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation. – 2007. – Vol. 14. – №. 4. – Pp. 834–845.
6. Takaki Koichi, Kirihara Hidekazu, Noda Chiharu, Mukaigawa Seiji, Fujiwara Tamiya. Production of an atmospheric-pressure glow discharge using an inductive energy storage pulsed power generator // Plasma Process. Polym. – 2006. – № 3. – Pp. 734–742.
7. Malik Muhammad Arif. Water purification by plasmas: which reactors are most energy efficient? // Plasma chemistry and plasma processes. – 2010. – № 30. – Pp. 21–31.
8. Sugai Taichi, Liu Wei, Tokuchi Akira, Jiang Weihua, Minamitani Yasushi. 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. – Vol. 41. – № 4. – Pp. 967–974.
9. Yokoo Tomoyuki, Saiki Kunihiko, Hotta Kazuaki, and Jiang Weihua. Repetitive pulsed high-voltage generator using semiconductor opening switch for atmospheric discharge // IEEE transactions on plasma science. – 2008. – Vol. 36. – № 5. – Pp. 2638–2643.
10. Zhang Yu and Liu Jinliang. Nanosecond-range multiple-pulse synchronization controlled by magnetic switches based on a communal magnetic core // IEEE transactions on plasma science. – 2013. – Vol. 41. – № 2. – Pp. 371–379.

Надійшла 09.10.2013

Остаточний варіант 09.01.2014