

## ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ ДРУГОГО ПОРЯДКУ З НЕЛІНІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ ІСКРОЕРОЗІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ В УМОВАХ ПРИМУСОВОГО ОБМЕЖЕННЯ ЇХНЬОЇ ТРИВАЛОСТІ

Н.А. Шидловська\*, чл.-кор. НАН України, С.М. Захарченко\*\*, докт.техн.наук,

О.П. Черкаський\*\*\*, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: [shydlovska@ied.org.ua](mailto:shydlovska@ied.org.ua), [snzakhar@ukr.net](mailto:snzakhar@ukr.net), [cherkassky\\_a@ukr.net](mailto:cherkassky_a@ukr.net),

*В програмному середовищі Matlab Simulink створено модель розрядно-імпульсної системи другого порядку з нелінійним описом еквівалентного електричного опору іскроерозійного навантаження. В умовах примусового обмеження тривалості розрядних імпульсів для низки значень індуктивності та ємності розрядного контуру і початкових умов на них розраховано перехідні електромагнітні процеси в системі. В групах режимів з фіксованими значеннями початкової напруги на робочому конденсаторі та в групах режимів з фіксованими значеннями амплітуди напруги вільних розрядів на навантаженні побудовано і проаналізовано залежності від тривалості розрядних імпульсів їхньої енергії, імпульсної потужності у навантаженні та швидкості її зміни. Показано, що в обох групах режимів для кожного набору значень параметрів: тривалості розрядних імпульсів, ємності робочого конденсатора і початкової напруги на ньому існує значення індуктивності розрядного контуру, яке забезпечує найбільші значення швидкості змін імпульсної потужності у навантаженні. У групах режимів з фіксованими значеннями амплітуди напруги вільних розрядів на навантаженні для описаного вище набору параметрів також існують значення індуктивності розрядного контуру, які забезпечують найбільші значення енергії та імпульсної потужності у навантаженні. Для трьох значень індуктивності розрядного контуру графічно вирішені задачі підвищення вказаних вище параметрів імпульсів. Бібл. 27, рис. 11.*

**Ключові слова:** іскроерозійне навантаження, нелінійна модель, розрядно-імпульсні системи, перехідний процес, тривалість імпульсів.

**Вступ.** Методи імпульсного іскро- та плазмоерозійного оброблення шарів гранул металів і сплавів у робочих рідинах є основою технологічних процесів виробництва їхніх мікродисперсних порошків із заданими властивостями: магнітною пам'яттю форми [1], високою густиною енергії [2], жароміцних [3], з аморфною структурою [4], а також нанодисперсних гідрозолів біологічно активних металів [5], очищення [6] і знезараження [7] природних і стічних вод, в тому числі і для потреб енергетики. Широке застосування цих методів можливе, зокрема, завдяки здатності керування дисперсністю ерозійних частинок шляхом зміни параметрів розрядних імпульсів [8]. Підвищення ефективності такого керування і розширення його діапазонів неможливі без всебічного дослідження впливу структури вихідних кіл розрядно-імпульсних систем (РІС) [9], які реалізують ці процеси, ємності [10, 11] та індуктивності їхніх розрядних контурів [12] і граничних умов на них [13, 14] на параметри перехідних електромагнітних процесів у навантаженні [15].

Моделювання перехідних процесів у вихідних колах РІС, іскроерозійне навантаження (ІЕН) яких спрощено представлено еквівалентним постійним активним опором, а також дослідження впливу параметрів реактивних елементів цих кіл на параметри перехідних процесів описано у багатьох публікаціях [16–18]. У роботах [19, 20] представлено аналогічні дослідження за примусового обмеження тривалості розрядних імпульсів. Такий підхід дає змогу підвищити середні за час протікання  $\tau$  розрядного струму  $i(t)$  значення швидкості його зростання  $di(t)/dt$ , швидкості зростання напруги на навантаженні  $du(t)/dt$ , середньої потужності у навантаженні  $\bar{P} = (1/\tau) \int_0^{\tau} i(t)u(t)dt$  та ін. [11] і сприяє зменшенню середніх розмірів ерозійних частинок [8]. Це, в свою чергу, підвищує енерго- та матеріа-

лоєфективність процесів отримання стійких до седиментації гідрозолів біологічно активних металів, а також очищення поверхневих і стічних вод.

Проте, такі спрощені моделі еквівалентного електричного опору (ЕЕО) ІЕН не враховують його нелінійні [21] і параметричні [22] властивості, а також стохастичні зміни [23] внаслідок високо-частотних міграцій великої кількості одночасно існуючих плазмових каналів по поверхні металевих гранул у їх шарі [16], через що не є точними. Нелінійні моделі ЕЕО таких навантажень є компромісом між складністю і точністю відтворення електрофізичних процесів у них. З використанням деяких з них проведено дослідження електромагнітних процесів у вихідних колах РІС без примусового обмеження тривалості розрядних імпульсів [8, 21]. Метою роботи є дослідження впливу параметрів реактивних елементів вихідного кола РІС з нелінійною моделлю ЕЕО ІЕН і граничних умов у них на параметри перехідного процесу в умовах примусового обмеження тривалості розрядних імпульсів.

**Методика і умови проведення чисельного експерименту.** Дослідження проводилися шляхом чисельного моделювання перехідних процесів у програмному пакеті Mathlab Simulink. Налаштування моделі ЕЕО ІЕН відповідали наступним реальним умовам проведення експерименту: 1) гранули алюмінію сферичної форми діаметром 4 мм; 2) висота і ширина їх шару в розрядній камері з вертикальними електродами, яка мала форму прямокутного паралелепіпеду, 50 і 22 мм відповідно, відстань між електродами 56 мм, а їхня висота – 78 мм; 3) робоча рідина – водопровідна вода з питомим електричним опором 25 Ом·м. Електродні потенціали, які при цьому виникають, враховувалися за методикою, описаною в [24].

Для 11 дискретних значень початкової напруги  $U_{C0}$  на робочому конденсаторі  $C$  у діапазоні від 48 до 400 В [24] проводилися розрахунки перехідних процесів у вихідному колі РІС. Для кожного значення  $U_{C0}$  тривалість розрядних імпульсів у навантаженні  $\tau$  примусово обмежувалася у діапазоні від 1 до 20 мкс з кроком 1 мкс. Нижня межа діапазону близька до мінімального часу відключення потужного біполярного транзистора з ізольованим затвором в реальній РІС [10]. Верхня межа діапазону приблизно на 30% перевищує мінімально можливе значення, яке можна досягти в реальній тиристорній РІС [5]. Моделювання для кожного значення  $U_{C0}$  проводилося для трьох найбільш поширених на практиці значень індуктивності розрядного контуру  $L_W$ : 0,5, 1,8 і 10 мкГн і для трьох значень ємності робочого конденсатора  $C$ : 50, 100 і 400 мкФ.

Схему заміщення ЕЕО ІЕН, яка використовувалася, наведено у [25]. Там же розраховано залежності параметрів її реактивних елементів від розмірів гранул і плазмових каналів між ними у робочому діапазоні частот. Активна складова ЕЕО ІЕН  $R$  описувалася нелінійною моделлю на основі степеневі функції від миттєвих значень струму  $i(t)$ , який протікає в ньому:  $R(i) = R_F (R_1 + E_1 |i|^{-1}) / (R_1 + E_1 |i|^{-1} + R_F)$  [24]. Поясненню фізичного змісту її параметрів і розрахунку їх значень в умовах експерименту для 11 дискретних значень  $U_{C0}$  присвячено окрему публікацію [24]. Тут лише зазначимо, що  $R_F$  моделює за різних значень прикладеної напруги активну складову ЕЕО води у двох зонах розрядної камери: зона 1 – над шаром гранул і зона 2 – між гранулами;  $R_1$  – активну складову опору шару алюмінієвих гранул з плазмовими каналами між ними;  $E_1$  – проти-ЕРС джерела, яке моделює відповідну складову падіння напруги на плазмових каналах [24].

**Simulink-модель вихідного кола РІС з іскроерозійним навантаженням** наведено на рис. 1. Робочий конденсатор РІС у моделі рис. 1 представлено ідеальним елементом з ємністю  $C$ . Сумарний активний опір замкнутого розрядного ключа і з'єднувальних кабелів представлено ідеальним елементом з постійним активним опором  $R_p$ . Індуктивність кабелів і елементів вихідного контуру РІС враховано ідеальним елементом з індуктивністю  $L_W$ . Опір шунта розрядної камери (6 Ом) представлено ідеальним резистором  $R_{shunt}$ . Лінійну складову активного опору моделі навантаження представлено ідеальним елементом  $R_l$ . Джерело  $E1$  схеми заміщення навантаження моделюється за допомогою керованого джерела напруги, позначеного  $CVS Spark$ , та модулем задання функції керування ним  $f(u) E1$ .

Схема заміщення опору заповненої водою зони 1 моделюється лінійною складовою  $R_{FL01}$  і керованим джерелом напруги  $CVS FL1$  з модулем функції керування  $RFL1(u)$ , які враховують особливості електродних процесів, викликані зміною прикладеної напруги [24]. Аналогічно, схема заміщення опору заповненої водою зони 2 моделюється лінійною складовою  $R_{FL02}$  і керованим джерелом напруги  $CVS FL2$  з модулем функції керування  $RFL2(u)$ , які враховують особливості електродних процесів, викликані зміною прикладеної напруги [24, 26]. Індуктивність схеми заміщення ЕЕО [25] навантаження представлено ідеальним елементом  $L_S$ , а ємність –  $C_S$ .

Для представлення залежностей від часу величин, що моделюються, в табличному вигляді використовуються стандартні блоки *ToWorkspace* бібліотеки Simulink/Sinks з наступними позначеннями:  $u, i, P, W, R$  – відповідно напруга на навантаженні, струм, потужність та енергія в ньому, а також його опору відповідно;  $iF, iF1, iF2, iS, iCS, iSh, iS\_Div\_iSh$  – сумарного струму у воді, струму у воді, що заповнює зони 1 та 2, струму плазмових каналів, струму ємності  $C_s$ , струму шунта і відношення струму плазмових каналів до струму шунта відповідно;  $Qf, Qf1, Qf2, Qs, Qs\_Div\_Qf$  – зарядів, які пройшли через всю воду, через воду, що заповнює зони 1 та 2, через плазмові канали та відношення заряду, що пройшов через плазмові канали до заряду, що пройшов через всю воду;  $du, di, dP, dR$  – похідних напруги на навантаженні, струму і потужності в ньому, а також його опору відповідно [24, 26].

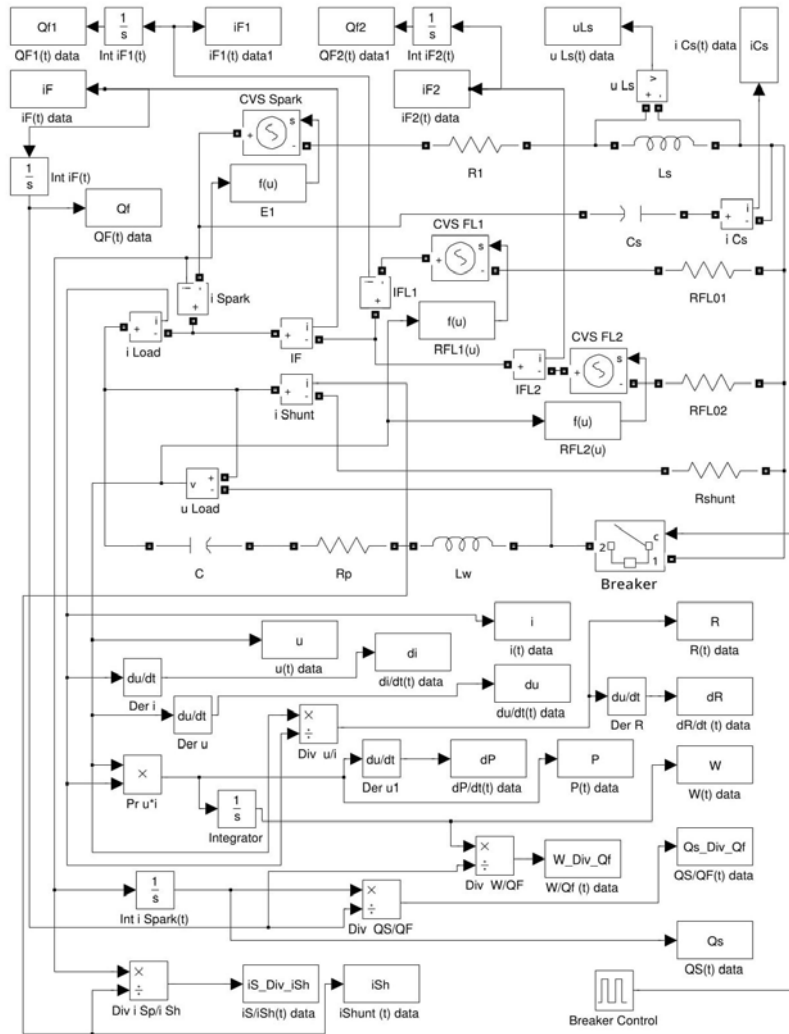


Рис. 1

і нульовому початковому струму дроселя  $L_W$  представлено на рис. 2 – 4 відповідно. Саме цей режим за  $L_W=1,8$  мкГн забезпечував амплітуду імпульсів напруги на навантаженні  $U_m=110$  В і був близьким до оптимального для очищення природних вод іскроерозійною коагуляцією [6]. Результати, отримані за інших значення ємності робочого конденсатора  $C$  та початкової напруги на ньому  $U_{C0}$ , за браком місця тут не наводяться, а їх аналіз може становити предмет окремих досліджень. Суцільними кривими на рис. 2 – 4 та рис. 7 – 9 представлено залежності, отримані для індуктивності розрядного контуру  $L_W=0,5$  мкГн, точками – для 1,8 мкГн, а штриховими – для 10 мкГн.

З підвищенням тривалості розрядних імпульсів  $\tau$  їхня енергія  $W$  монотонно збільшується (рис. 2). Найбільші її значення та швидкості зростання спостерігаються за найменшого значення індуктивності  $L_W$ . На ділянці малої тривалості імпульсів (приблизно до 1 мкс для  $L_W=0,5$  мкГн та до приблизно 6 мкс для 10 мкГн) швидкість зростання  $W$  найменша. На середній ділянці вона найбільша, а наприкінці розглянутого діапазону змін  $\tau$  знову уповільнюється. Найкраще це видно для малих

Модулі, за допомогою яких здійснюються операції взяття похідних, позначені *Der*, інтегрування – *Int*, ділення – *Div*, множення – *Pr*. Керування тривалістю розрядного імпульсу виконується за допомогою керованого вимикача, який позначено *Breaker*. Сигнал керування ним формується блоком *Breaker Control* на основі наперед заданого значення тривалості імпульсу.

**Результати моделювання та обговорення.** Залежності від часу струму у навантаженні, напруги на ньому, миттєвої потужності, їхніх похідних, а також заряду мали вид, аналогічний відповідним залежностям [26] і [8] на тих же ділянках зміни аргументу, оскільки в цих роботах використовувалася така ж сама модель ЕЕО ІЕН, але тривалість розрядних імпульсів не обмежувалася. Тому на цих залежностях зупинятися не будемо.

Результати розрахунків залежностей від тривалості розрядних імпульсів  $\tau$  енергії у навантаженні

$$W = \int_0^{\tau} i(t)u(t)dt, \text{ середніх за час } \tau$$

імпульсної потужності  $\bar{P}$  та швидкості її зростання  $dP/dt_{cp}$  для  $C=\text{const}=50$  мкФ,  $U_{C0}=\text{const}=121,6$  В

значень  $L_W$ , за яких найбільша частка енергії конденсатора передається у навантаження у розглянутому діапазоні тривалості імпульсів. Для забезпечення прийнятної продуктивності процесу бажано, щоб імпульси обмежувалися не раніше, ніж наприкінці другої ділянки залежностей рис. 2. Але відносно великі значення  $L_W$  не дають змогу ефективно передавати енергію робочого конденсатора у навантаження у таких умовах і для роботи з імпульсами, тривалість яких обмежується 10 мкс, бажано, щоб  $L_W$  не перевищувала 0,5 мкГн, що доволі складно забезпечити на практиці [27].

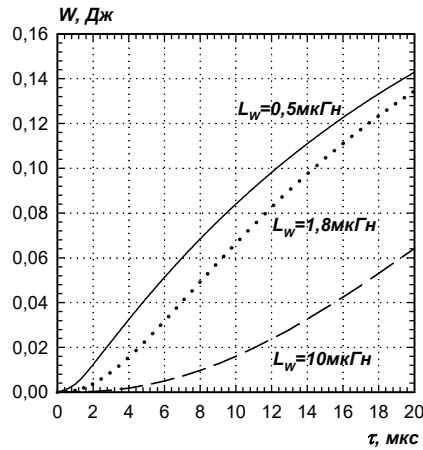


Рис. 2

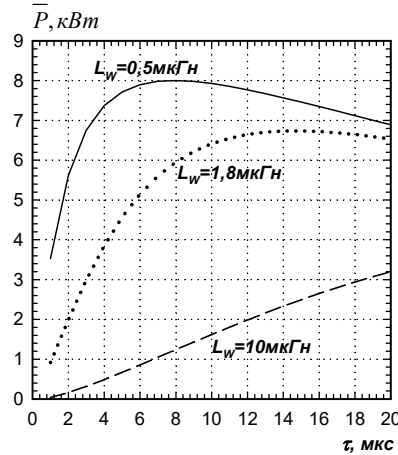


Рис. 3

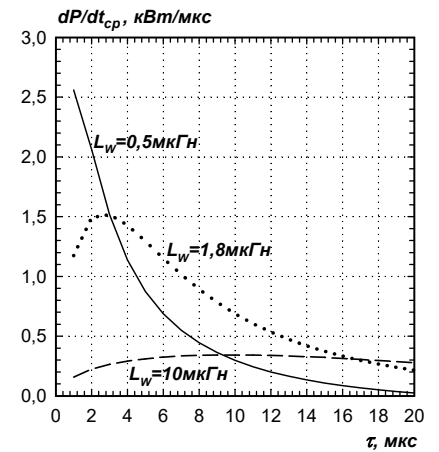


Рис. 4

У разі збільшення початкової напруги на конденсаторі  $U_{C0}$  збільшуються значення  $W$  за тих же самих значень  $\tau$ , що призводить до збільшення куту нахилу  $W(\tau)$  до осі абсцис. Це узгоджується з результатами моделювання перехідних процесів з використанням лінійних моделей ЕЕО ІЕН. Деякі розбіжності в цих залежностях для лінійних і нелінійних моделей ЕЕО ІЕН можуть бути предметом подальших досліджень.

Залежності середньої імпульсної потужності у навантаженні  $\bar{P}$  від тривалості імпульсу за  $L_W=0,5$  та  $1,8$  мкГн, представлені на рис. 3, мають екстремуми. Залежність  $\bar{P}(\tau)$  за  $L_W=10$  мкГн також має екстремум, але він знаходиться поза межами діапазону тривалості імпульсів, який наведено на рис. 3. Значення абсцис цих екстремумів збільшуються із збільшенням значень  $L_W$ , а ординат, навпаки, зменшуються. Крім того, ширина піків залежностей збільшується із збільшенням  $L_W$ . Тобто, для кожного набору значень  $C$ ,  $L_W$  та ЕЕО навантаження в його лінійній моделі за критерієм максимуму  $\bar{P}$  існує оптимальне значення тривалості розрядного імпульсу  $\tau$ . Якщо використовується нелінійна модель ЕЕО навантаження, то треба ще брати до уваги початкові умови на реактивних елементах розрядного контуру. У разі збільшення початкової напруги на конденсаторі значення імпульсної потужності у навантаженні, а також кут нахилу залежності  $\bar{P}(\tau)$  до осі абсцис збільшуються. У разі збільшення ємності робочого конденсатора збільшуються як ординати, так і абсциси екстремумів  $\bar{P}(\tau)$  для всіх  $L_W$ , крім того, збільшується ширина піків цих залежностей.

Залежності середньої швидкості зміни потужності у навантаженні  $dP/dt_{cp}$  від  $\tau$  (рис. 4) також мають екстремуми. Значення їхніх абсцис збільшуються із збільшенням значень  $L_W$ , а ординат – зменшуються. Ширина піків залежностей  $dP/dt_{cp}$  від  $\tau$  збільшується із збільшенням  $L_W$ . Ці особливості залежностей рис. 4 і 3 спільні, хоча їхні графіки мають різний вигляд. Істотною відмінністю залежностей рис. 4 від залежностей рис. 3 є наявність точок перетину кривих, отриманих за різних значень  $L_W$ . Це вказує на існування задачі пошуку оптимального значення індуктивності контуру, за якого середнє значення швидкості зміни потужності досягає свого максимуму за умов примусового обмеження тривалості імпульсів, фіксованих значень ємності робочого конденсатора і початкової напруги на ньому.

Отриману за результатами, наведеними на рис. 4, та за розрахунками за інших значень  $U_m$  залежність тривалості імпульсів в точках перетину пари залежностей  $dP/dt_{cp}$  від  $\tau$  для  $L_W=0,5$  мкГн та  $L_W=10$  мкГн при  $C=50$  мкФ представлено на рис. 5 трикутниками, які з'єднано штриховою лінією. Вище цієї лінії значення  $dP/dt_{cp}$  для  $L_W=10$  мкГн будуть більшими, ніж для  $L_W=0,5$  мкГн. Тобто, для пари значень  $L_W=0,5$  та  $10$  мкГн графічно вирішено задачу вибору режимів з більшим або меншим

значенням  $dP/dt_{cp}$  у разі зміни амплітуди імпульсів навантаженні  $U_m$ . Як випливає з аналізу рис. 5, для імпульсів, чия тривалість становить більше приблизно 13 мкс (для  $U_m=40$  та 350 В), більші значення  $dP/dt_{cp}$  спостерігаються для  $L_W=10$  мкГн, ніж для  $L_W=0,5$  мкГн. Для  $U_m=110$  В ордината точки рівності значень  $dP/dt_{cp}$  для  $L_W=10$  мкГн та  $L_W=0,5$  мкГн становить приблизно 9 мкс. Отже, у випадку обмеження тривалості імпульсів значенням 9 мкс і менше, для забезпечення більшого середнього значення похідної потужності з двох наведених вище значень  $L_W$  потрібно вибирати менше (у нашому випадку 0,5 мкГн).

Отримані на основі аналізу точок перетину пар залежностей рис. 4 для  $L_W=0,5$  і 1,8 мкГн, а також для  $L_W=1,8$  і 10 мкГн та розрахунків за інших значеннях  $U_m$  залежності від них тривалості імпульсів в точках перетину цих ліній наведені на рис. 6. Всі розрахунки, результати яких представлено на рис. 6, виконувалися для  $C=50$  мкФ. Точками позначено границю, вище якої значення  $dP/dt_{cp}$  будуть більші для  $L_W=10$  мкГн, ніж для  $L_W=1,8$  мкГн. Суцільною лінією позначено границю, вище якої значення  $dP/dt_{cp}$  будуть більші для  $L_W=1,8$  мкГн, ніж для  $L_W=0,5$  мкГн. Таким чином, всю площину графіка рис. 6 розбито на три зони, для кожної з яких одне з трьох розглянутих значень  $L_W$  забезпечує більші значення  $dP/dt_{cp}$ . Отже, для кожної тривалості імпульсів за кожного значення амплітуди їх напруги і ємності робочого конденсатора існує значення індуктивності розрядного контуру, для якого значення  $dP/dt_{cp}$  найбільші. Зі зменшенням  $\tau$  значення  $L_W$ , за яких  $dP/dt_{cp}$  досягає максимальних значень, також зменшуються.

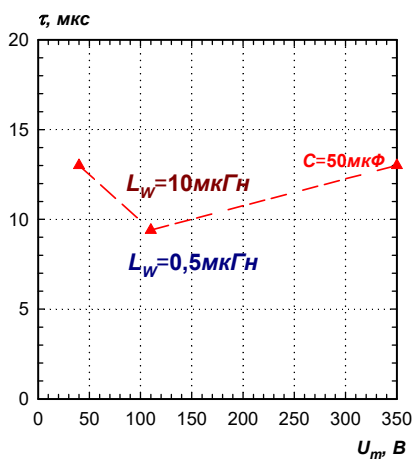


Рис. 5

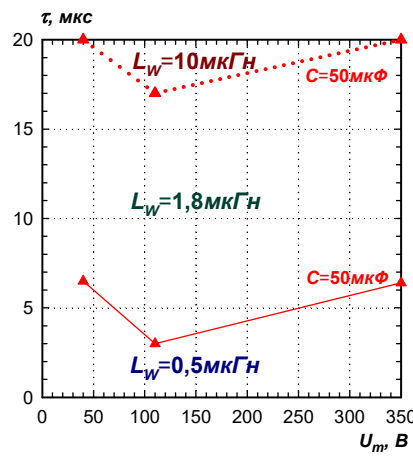


Рис. 6

Постійне значення  $U_{C0}$  за постійній  $C$  та зміні значень  $L_W$  забезпечує однакову енергію в системі на початку перехідного процесу. Але в умовах примусового обмеження  $\tau$ , використання нелінійної моделі ЕЕО ІЕН і наявності опору втрат в розрядному контурі РІС для різних  $L_W$  енергія, яка передається у навантаження, буде різною. Фіксація значень амплітуди напруги вільних розрядів на навантаженні  $U_m$ , так само, як і фіксація значень  $U_{C0}$ , не забезпечує однако-

вих значень енергії, яка передається у навантаження у таких умовах для різних значень  $L_W$ . Але, як показала практика, в реальних технологічних процесах більший вплив на властивості продукції, яка отримується, має не початкова напруга на робочому конденсаторі  $U_{C0}$ , а амплітуда імпульсів напруги на навантаженні. Тому описані вище серії чисельних експериментів було повторено за умов однакових значень  $U_m$ , а не  $U_{C0}$ , як у попередніх серіях.

Задля можливості порівняння результатів, отриманих в обох серіях чисельних експериментів, значення  $U_{C0}$  у другій серії підбиралися таким чином, щоб значення  $U_m$  для  $L_W=1,8$  мкГн (найбільш поширене на практиці значення) співпадали із значеннями  $U_m=110$  В попередньої серії. Звісно, для  $L_W=0,5$  мкГн значення  $U_m$  у новій серії експериментів були нижчі за відповідні значення попередньої серії, а для  $L_W=10$  мкГн, навпаки – вищі, що обумовило деякі відмінності отриманих нових залежностей від попередніх. На рис. 7 – 9 наведено отримані для  $U_m=\text{const}=110$  В нові залежності  $W(\tau)$ ,  $\bar{P}(\tau)$  та  $dP/dt_{cp}(\tau)$  відповідно. Багато в чому їх характери схожі на характери відповідних залежностей попередньої серії чисельних експериментів, проведеної за умови  $U_{C0}=\text{const}=121,6$  В, що відповідає  $U_m=110$  В для  $L_W=1,8$  мкГн. Тому зосередимося лише на відмінностях.

Оскільки значення напруги на навантаженні в новій серії експериментів для  $L_W=0,5$  мкГн були нижчими за відповідні значення у попередній серії за тих же значень аргументу, а для  $L_W=10$  мкГн – вищими, то і значення енергії імпульсів на рис. 7 для  $L_W=0,5$  мкГн були нижчими, а для  $L_W=10$  мкГн – вищими, ніж відповідні значення на рис. 2. Це спричинило перетин залежностей  $W(\tau)$  на рис. 7, отриманих для різних значень  $L_W$ , чого не спостерігалось на рис. 2. Тобто, в умовах фіксованих значень  $U_m$  для кожного значення тривалості розрядних імпульсів у разі її примусового обмеження існує

значення індуктивності розрядного контуру, яке забезпечує максимальне значення енергії імпульсу у навантаженні. На рис. 7 графічно вирішено задачу вибору  $L_W$  з двох запропонованих значень (0,5 та 1,8 мкГн), яка забезпечує більші значення  $W$  за заданій  $\tau$ . В описаних умовах для імпульсів, тривалість яких менше приблизно 13 мкс, більші значення  $W$  забезпечує  $L_W=0,5$  мкГн, ніж  $L_W=1,8$  мкГн, а для імпульсів з тривалістю більше 13 мкс – навпаки. Вирішення аналогічної задачі для інших пар значень  $L_W$  виходить за рамки розглянутих на рис. 7 діапазонів змін  $\tau$ . Судячи з рис. 7, в умовах  $U_m=\text{const}$  значення  $L_W$ , яке забезпечує найбільше значення  $W$ , зменшується у разі зменшення  $\tau$ . Збільшення ємності робочого конденсатора  $C$  призводить до зменшення кривизни залежностей  $W(\tau)$ , збільшення їх куту нахилу до осі абсцис та значень енергії.

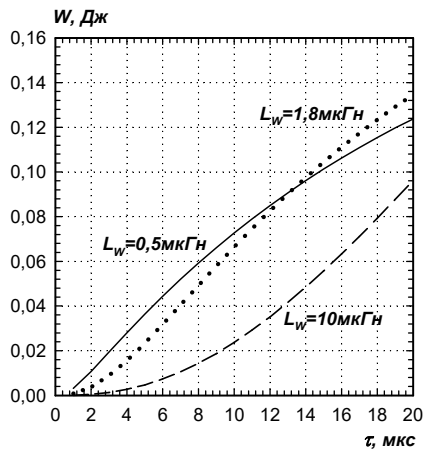


Рис. 7

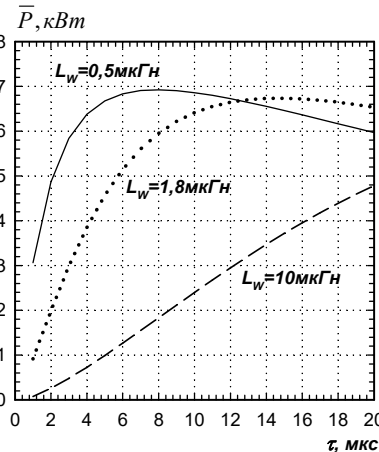


Рис. 8

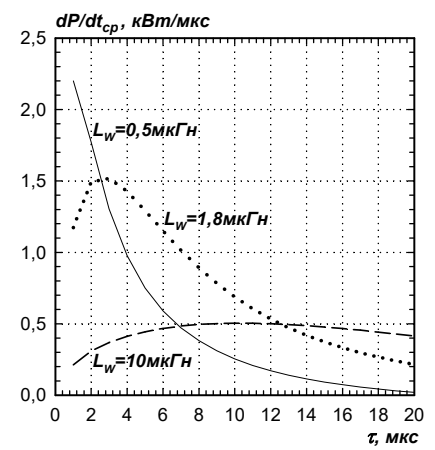


Рис. 9

Внаслідок описаних вище особливостей, спричинених умовою  $U_m=\text{const}$ , представлені на рис. 8 залежності  $\bar{P}(\tau)$  для  $L_W=0,5$  мкГн мають менші значення за тих же самих значень аргументу, ніж на рис. 3, а для  $L_W=10$  мкГн – більші. Крім того, залежності  $\bar{P}(\tau)$  для різних значень  $L_W$  на рис. 8 мають точки перетину на відміну від залежностей на рис. 3. Діапазон змін  $\tau$  на рис. 8 дає змогу графічно вирішити задачу вибору  $L_W$  для підвищення значень  $\bar{P}$  лише для однієї пари значень  $L_W$ : 0,5 та  $L_W=1,8$  мкГн. Її вирішенням є  $\tau \approx 12,5$  мкс. Якщо тривалість імпульсів менше цього значення, то більші значення  $\bar{P}$  будуть спостерігатися для  $L_W=0,5$  мкГн, а якщо  $\tau > 12,5$  мкс, то – для  $L_W=1,8$  мкГн. Розширення діапазону зміни  $\tau$  дасть змогу вирішити цю задачу для інших пар значень  $L_W$ . Як і у попередньому випадку, із зменшенням значень  $\tau$  зменшуються значення  $L_W$ , за яких  $\bar{P}$  максимальна.

Через особливості умови  $U_m=\text{const}$  значення  $dP/dt_{cp}(\tau)$  для  $L_W=0,5$  мкГн на рис. 9 менші, ніж на рис. 4 для однакових значень аргументу, а для  $L_W=10$  мкГн – більші. Це спричинило зсув точок перетину пар залежностей  $dP/dt_{cp}(\tau)$ , отриманих для різних значень  $L_W$ , в область менших значень  $\tau$  порівняно з рис. 4, особливо для відносно великих значень  $L_W$ .

Отримані за результатами, наведеними на рис. 9, і розрахунками за інших значеннях  $U_m$  та  $C$  залежності тривалості імпульсів в точках перетину пари залежностей  $dP/dt_{cp}$  від  $\tau$  для  $L_W=0,5$  мкГн та  $L_W=10$  мкГн представлені на рис. 10 для  $C=50$  мкФ трикутниками, для  $C=100$  мкФ – ромбами, а для  $C=400$  мкФ – колами та з'єднані штриховими лініями. Аналогічні залежності для пар значень  $L_W=0,5$  і 1,8 мкГн, та  $L_W=1,8$  і 10 мкГн представлені на рис. 11, з'єднані суцільними лініями і точками відповідно.

Форми залежностей від  $U_m$  значень тривалості імпульсів, за якої спостерігаються однакові значення  $dP/dt_{cp}$  для різних пар значень  $L_W$  (рис. 10, рис. 11) нагадують віддзеркалену відносно осі абсцис форму залежності параметра  $R_I$  від  $U_m$  математичної нелінійної моделі ЕЕО ІЕН [24], яку було покладено в основу simulink-моделі, зображення якої представлено на рис. 1. Отже, саме залежність основної компоненти активної складової ЕЕО ІЕН від  $U_m$  в основному зумовлює залежність від  $U_m$  значень тривалості імпульсів, за якої спостерігаються однакові значення  $dP/dt_{cp}$  для різних пар значень  $L_W$ . Найбільші значення  $R_I$  спостерігаються при  $U_m=250$  В [24], що відповідає найменшим значенням цієї тривалості імпульсів. Збільшення значень  $C$  зумовлює зростання зазначеної вище тривалості імпульсів для всіх досліджених пар значень  $L_W$ . Особливо це помітно для великих значень  $L_W$ .

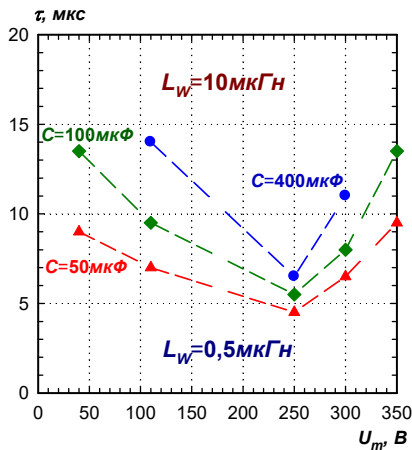


Рис. 10

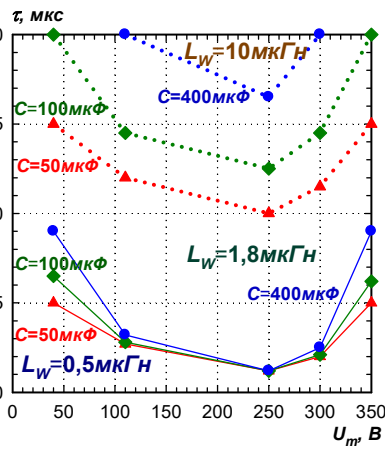


Рис. 11

Отже, для кожного набору значень  $C$ ,  $L_w$ ,  $U_m$  та залежної від  $U_m$  активної складової ЕЕО навантаження існує оптимальне значення тривалості розрядного імпульсу  $\tau$ , яке забезпечує найбільше значення  $dP/dt_{cp}$ .

**Узагальнення, висновки та рекомендації.** 1. В усіх режимах, що досліджувалися, найбільший кут нахилу до осі абсцис залежностей енергії імпульсів від їхньої тривалості спостерігався на середній ділянці розглянутого діапазону змін аргументу.

Для забезпечення прийнятної продуктивності процесу бажано, щоб тривалість імпульсів обмежувалася не раніше, ніж наприкінці цієї ділянки. Зменшення індуктивності розрядного контуру призводить до зменшення значень аргументу, які належать до центральної ділянки залежності енергії імпульсів від їхньої тривалості та до збільшення значень енергії імпульсів за менших значення їхньої тривалості.

2. Для кожного значення ємності робочого конденсатора в групах режимів з фіксацією значень амплітуди напруги вільних розрядів на навантаженні, на відміну від груп режимів з фіксацією початкової напруги на робочому конденсаторі, кожному значенню тривалості розрядних імпульсів при її примусовому обмеженні відповідає значення індуктивності розрядного контуру, яке забезпечує максимальне значення енергії імпульсів у навантаженні.

3. Для кожного набору значень ємності робочого конденсатора, початкової напруги на ньому, індуктивності розрядного контуру та еквівалентного електричного опору навантаження за критерієм максимуму середньої імпульсної потужності існує оптимальне значення тривалості розрядного імпульсу. Особливо яскраво це видно в групах режимів з фіксацією значень амплітуди напруги вільних розрядів на навантаженні. Значення цієї тривалості імпульсів збільшуються із збільшенням індуктивності розрядного контуру, ємності робочого конденсатора і зменшенням активної складової еквівалентного активного опору навантаження.

4. Залежності середньої швидкості зміни потужності у навантаженні від тривалості імпульсів мають екстремуми. Значення їх абсцис збільшуються із збільшенням значень індуктивності розрядного контуру, а ординат – зменшуються. Ширина піків цих залежностей збільшується із збільшенням індуктивності контуру. Для кожного набору значень ємності робочого конденсатора, індуктивності розрядного контуру, напруги розрядних імпульсів та залежної від неї активної складової еквівалентного електричного опору навантаження існує оптимальне значення тривалості розрядного імпульсу, яке забезпечує найбільше значення середньої швидкості зміни потужності у навантаженні. Значення цієї тривалості імпульсів збільшуються із збільшенням індуктивності розрядного контуру, ємності робочого конденсатора і зменшенням активної складової еквівалентного активного опору навантаження.

5. Для трьох розглянутих значень індуктивності розрядного контуру графічно вирішено задачу вибору значення, яке забезпечує найбільшу середню швидкість зміни імпульсної потужності у досліджених діапазонах змін примусово обмеженої тривалості розрядних імпульсів, їх напруги та ємності робочого конденсатора.

*Роботу виконано за бюджетною темою «Розробити нові математичні моделі та методи дослідження електрофізичних процесів і полів в електротехнічному обладнанні для вирішення задач його надійної експлуатації та діагностування» (шифр «Комплекс-5»). Державний реєстраційний номер 0121U107443, КПКВК 6541030.*

1. Perekos A.E., Chernenko V.A., Bunayev S.A., Zalutskiy V.P., Ruzhitskaya T.V., Boitsov O.F., Kakazei G.N. Structure and Magnetic Properties of Highly Dispersed Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark-Erosion. *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112. Pp. 093909-1 – 093909-7. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4764017>

2. Nguyen P.K., Jin S., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. Pp. 17A756-1 – 17A756-3. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>
3. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов. Фрунзе: Илим, 1990. 256 с.
4. Aur S., Egami T., Berkowitz A.E., Walter J.L. Atomic Structure of Amorphous Particles Produced by Spark Erosion. *Physical Review B*. 1982. Vol. 26. No 12. Pp. 6355–6361. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.26.6355>
5. Lopatko K.G., Melnichuk M.G., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.V. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture*. 2013. Vol. 61. Pp. 105–115.
6. Шидловский А.К., Щерба А.А., Захарченко С.Н. Перспективы применения искроэрозионной коагуляции в системах водоподготовки тепловых сетей. *Энергетика и электрификация*. 2002. № 12. С. 34–40.
7. Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфицирующее действие объемного электроискрового разряда в воде. *Химия и технология воды*. 1999. Т. 21. №3. С. 328 – 336.
8. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Анализ электромагнитных процессов в выходной цепи генератора разрядных импульсов с нелинейной моделью плазмоэрозионной нагрузки при изменении их параметров в широких диапазонах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 87–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.087>
9. Suprunovska N.I., Shcherba M.A., Peretyatko Yu.V., Roziskulov S.S. Decrease of Transients Durations and Improvement of Dynamic Characteristics of Electrical Discharge Installations by Changing the Structure of their Discharge Circuit. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 15–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.015>
10. Щерба А.А., Супруновська Н.І., Ломко М.О. Вплив ємності конденсатора розрядного кола напівпровідникових електророзрядних установок на їхні вихідні струми обмеженої тривалості. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 58. С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.005>
11. Супруновская Н.И., Щерба А.А., Розискулов С.С., Перетятко Ю.В. Особенности повышения скорости нарастания токов в нагрузке полупроводниковых электроразрядных установок. *Праці ІЕД НАНУ*. 2017. Вип. 47. С. 77–85.
12. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Влияние индуктивности и ёмкости разрядной цепи конденсаторов полупроводниковых электроимпульсных установок на их выходные токи ограниченной длительности. *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит*. 2014. Спец. выпуск. Т. 1. № 9 (128). С. 60–67.
13. Шидловский А.К., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электрических цепях разрядно-импульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку и ненулевых условиях его заряда. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 1. С. 42–48.
14. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. К.: Интерконтиненталь-Украина, 2009. 208 с.
15. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 3–9.
16. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the Formation of Multi-Channel Pulse Currents and Fast-Migrating Electric Sparks in the Layer of Current-Conducting Granules of Electric-Discharge Installations. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 2. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>
17. Листовский Д.И., Петриченко С.В. Оптимизация режимов электроискрового диспергирования металлических гранул в жидкости по распределению энергии, выделившейся в элементах разрядной цепи. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2016. № 36 (1208). С. 58–65.
18. Петриченко С.В., Кускова Н.И., Листовский Д.И. Сравнение электрических характеристик искровых разрядов в слое металлических и графитовых гранул, погруженных в жидкость. *Электронная обработка материалов*. 2015. № 51(3). С. 38–43.
19. Супруновская Н.И. Переходные процессы при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку и ограничении длительности протекающих в ней импульсных токов. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 5. С. 20–26.
20. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Сеницын В.К. Пути повышения скорости нарастания тока в нагрузке электроразрядных установок. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.003>
21. Супруновская Н.И. Моделирование и анализ процессов в электрических цепях полупроводниковых электроразрядных установок с нелинейной электроискровой нагрузкой. *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит*. 2014. Спец. выпуск. Т. 1. №9 (128). С. 34–44.
22. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Параметрична модель опору плазмоерозійного навантаження, адекватна в широкому діапазоні змін прикладеної напруги. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 3. С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.03.003>



23. Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. Kyiv, Ukraine, June 7–11, 2016. Pp. 45–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521887>
24. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Нелинейно-параметрическая модель электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред для широкого диапазона изменений приложенного напряжения. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 6. С. 3–17.
25. Захарченко С.Н. Физическая модель гранулированной токопроводящей среды. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 6. С. 19–26.
26. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Модель выходной цепи генератора разрядных импульсов с плазмозероизирующей нагрузкой адекватная в широких диапазонах изменений их параметров. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 6. С. 69–77.
27. Suprunovska N.I., Shcherba M.A., Roziskulov S.S., Synytsyn V.K. Improving the Dynamic Characteristics of Electric Discharge Installations, which are Significantly Distant from the Spark-erosion Load. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.016>

## FEATURES OF TRANSIENTS IN SECOND-ORDER CIRCUITS WITH A NONLINEAR MODEL OF SPARK-EROSION LOAD UNDER CONDITIONS OF FORCED LIMITATION OF THEIR DURATION

N.A. Shydlovska, S.M. Zakharchenko, O.P. Cherkaskyi

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: [shydlovska@ied.org.ua](mailto:shydlovska@ied.org.ua), [snzakhar@ukr.net](mailto:snzakhar@ukr.net), [cherkassky\\_a@ukr.net](mailto:cherkassky_a@ukr.net)

*In the Matlab Simulink software environment a model of a second-order discharge-pulse system with a nonlinear description of the equivalent electrical resistance of a spark-erosion load was created. Under conditions of forced limitation of the duration of discharge pulses for a series of values of the inductance and capacitance of the discharge circuit, as well as the initial conditions in them, transients in the system are calculated. In groups of modes with fixed values of the initial voltage on the working capacitor and in groups of modes with fixed values of voltage amplitude of the free discharges on load, the dependences on duration of the discharge pulses of their energy, pulse power in the load, and the rate of its change are plotted and analyzed. It is shown that in both groups of modes for each set of parameter values of: the duration of the discharge pulses, the capacitance of the working capacitor and the initial voltage on it, there is a value of the inductance of the discharge circuit, which provides the highest values of the rate of change of the pulse power in the load. In the groups of modes with fixed values of the voltage amplitude of free discharges on the load, for the set of parameters described above, there are also values of the discharge circuit inductance that provide the highest values of energy and pulse power in the load. For three values of the inductance of the discharge circuit, the problems of increasing the above pulse parameters are graphically solved. References 27, figures 11.*

**Keywords:** spark-erosion load, nonlinear model, discharge-pulse systems, transients, pulse duration.

1. Perekos A.E., Chernenko V.A., Bunayev S.A., Zalutskiy V.P., Ruzhitskaya T.V., Boitsov O.F., Kakazei G.N. Structure and Magnetic Properties of Highly Dispersed Ni-Mn-Ga Powders Prepared by Spark-Erosion. *Journal of Applied Physics*. 2012. Vol. 112. Pp. 093909-1 – 093909-7. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4764017>
2. Nguyen P.K., Jin S., Berkowitz A.E. MnBi particles with high energy density made by spark erosion. *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. Pp. 17A756-1 – 17A756-3. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4868330>
3. Asanov U.A., Tsoj A.D., Shcherba A.A., Kazekin V.I. Electroerosive technology of interconnections and powders of metals. Frunze: Ilym, 1990. 256 p. (Rus)
4. Aur S., Egami T., Berkowitz A.E., Walter J.L. Atomic Structure of Amorphous Particles Produced by Spark Erosion. *Physical Review B*. 1982. Vol. 26. No 12. Pp. 6355–6361. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.26.6355>
5. Lopatko K.G., Melnichuk M.G., Aftandilyants Y.G., Gonchar E.N., Boretskij V.F., Veklich A.N., Zakharchenko S.N., Tugay T.I., Tugay A.V., Trach V.V. Obtaining of metallic nanoparticles by plasma-erosion electrical discharges in liquid mediums for biological application. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture*. 2013. Vol. 61. Pp. 105–115.
6. Shidlovskiy A.K., Shcherba A.A., Zakharchenko S.N. Prospects for the use of spark erosion coagulation in water treatment systems of heat networks. *Energetika i elektrifikatsiya*. 2002. No 12. Pp. 34–40. (Rus)
7. Goncharuk V.V., Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Savluk O.S., Potapchenko N.G., Kosinova V.N. Disinfectant action of the volume electrospark discharges in water. *Khimiia i tehnologiiia vody*. 1999. Vol. 21. No 3. Pp. 328 – 336. (Rus)
8. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkassky O.P. The Analysis of Electromagnetic Processes in Output Circuit of the Generator of Discharge Pulses with Non-linear Model of Plasma-erosive Load at Change Their Parameters in Wide Ranges. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 1. Pp. 87–95. (Rus). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.087>

9. Suprunovska N.I., Shcherba M.A., Peretyatko Yu.V., Roziskulov S.S. Decrease of Transients Durations and Improvement of Dynamic Characteristics of Electrical Discharge Installations by Changing the Structure of their Discharge Circuit. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 4. Pp. 15–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.04.015>
10. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Lomko M.O. Influence of the Capacitance of the Capacitor of the Discharge Circuit of Semiconductor Electric Discharge Installations on their Output Currents of Limited Duration. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2021. Issue 58. Pp. 5–13. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.005>
11. Suprunovska N.I., Shcherba A.A., Roziskulov S.S., Peretyatko Yu.V. Features of rate of current raise in the load of semi-conductor electro-discharge installations. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. Issue 47. Pp. 77–85. (Rus)
12. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Influence of Inductance and Capacitance of Discharge Circuit of Capacitors of Semiconductor Pulse Installations on its Output Currents with Limited Duration. *Energy saving, Power engineering, Energy audit*. 2014. No 9 (128). Special Issue. Vol. 1. Pp. 60–67. (Rus)
13. Shidlovskiy A.K., Suprunovskaya N.I. Energy processes in electrical circuits of discharge-pulse installations with a capacitive energy storage device with limited duration of its discharge to an electric-spark load and non-zero conditions of its charge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No 1. Pp. 42–48. (Rus)
14. Shydlovskiy A.K., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Power Processes in Electrical Pulse Devices with Capacitive Energy Storages. Kyiv: Intercontinental-Ukraina, 2009. 208 p. (Rus)
15. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Increasing Regularities of Rate of Current Rise in the Load at Limiting its Maximal Values. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 5. Pp. 3–9. (Rus)
16. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the Formation of Multi-Channel Pulse Currents and Fast-Migrating Electric Sparks in the Layer of Current-Conducting Granules of Electric-Discharge Installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 2. Pp. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>
17. Listovskii D.I., Petrichenko S.V. Electrosark dispersion of metal granules regimes' optimization on distribution of energy released in discharge circuit elements. *Bulletin of NTU "KhPI"*. 2016. No 36 (1208). Pp. 58–65. (Rus)
18. Petrichenko S.V., Kuskova N.I., Listovskii D.I. Comparison of electrical characteristics of spark discharges in a layer of metal and graphite granules loaded in a liquid. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 2015. No 51(3). Pp. 38–43. (Rus)
19. Suprunovskaya N.I. Transients during the discharge of a capacitor on an electrosark load and limitation of the duration of pulsed currents flowing in it. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2008. No 5. Pp. 20–26. (Rus)
20. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Synytsyn V.K., Ways to Increase the Rate of Current Rise in the Load of Electric Discharge Installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.003> (Rus)
21. Suprunovska N.I. Modeling and Transient Analysis in Electric Circuits of Semi-conductor Electro-Discharge Installations with Nonlinear Electro-spark Load. *Energy saving, Power engineering, Energy audit*. 2014. No 9 (128). Special Issue. Vol. 1. Pp. 34–44.
22. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskiy O.P. Parametric Model of Resistance of Plasma-erosive Load, Adequate in the Wide Range of Change of Applied Voltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 3. Pp. 3–12. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.03.003>
23. Ivashchenko D.S., Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Analyzing Probabilistic Properties of Electrical Characteristics in the Circuits Containing Stochastic Load. *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems IEPS-2016*. Kyiv, Ukraine, June 7–11, 2016. Pp. 45–48. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2016.7521887>
24. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkassky A.P. Nonlinear-parametrical Model of Electrical Resistance of Current-Carrying Granulated Mediums for a Wide Range of Applied Voltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 6. Pp. 3–17. (Rus)
25. Zakharchenko S.M. Physical Model of the Granulated Current-carrying Medium. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 6. Pp. 19–26. (Rus)
26. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.M., Cherkassky O.P. Model of an Output Circuit of the Discharge Pulses Generator with a Plasma-erosive Load Adequate in Wide Range of Changes of Their Parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No 6. Pp. 69–77. (Rus)
27. Suprunovska N.I., Shcherba M.A., Roziskulov S.S., Synytsyn V.K. Improving the Dynamic Characteristics of Electric Discharge Installations, which are Significantly Distant from the Spark-erosion Load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No 3. Pp. 16–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.016>

Надійшла 17.06.2022