

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНІЙ СИСТЕМІ
ОБРОБЛЕННЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ СТРУМОПРОВІДНИХ СЕРЕДОВИЩ З
ВИКОРИСТАННЯМ УТОЧНЕНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ЇХНЬОГО ОПОРУ ВІД ЧАСУ

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, snzakhar@ukr.net, cherkassky_a@ukr.net

Досліджено залежності від часу опору плазмоерозійного навантаження. Вперше виявлено дві нові характерні ділянки першої моди цієї залежності. В результаті їхнього аналізу обґрунтовано явище повторного утворення струмерних і лідерних плазмових каналів після згасання переважної більшості плазмових каналів, які утворилися раніше. З урахуванням двох нових характерних ділянок першої моди залежності опору плазмоерозійного навантаження від часу побудовано її уточнену параметричну модель. Знайдено оптимальні за критеріями трьох основних параметрів нев'язки апроксимації значення параметрів цієї моделі. Запропоновано функції, які апроксимують залежності цих параметрів від амплітуди імпульсів напруги, прикладеної до навантаження, та знайдено оптимальні значення їхніх коефіцієнтів. У програмному пакеті Mathlab Simulink створено модель розрядно-імпульсної системи з уточненою параметричною моделлю плазмоерозійного навантаження і розраховано перехідні процеси у ній. Представлено оцінку адекватності моделювання перехідних процесів у порівнянні з реальними процесами. Бібл. 18, рис. 4, табл. 4.

Ключові слова: плазмоерозійне навантаження, параметрична модель, розрядно-імпульсна система, перехідні процеси, адекватність.

Вступ. Підвищення адекватності моделювання перехідних процесів у розрядно-імпульсних системах оброблення гранульованих струмопровідних середовищ (ГСПС) дає змогу не тільки підвищити точність прогнозів щодо розмірів [5, 7], структурно-фазового стану [5], фізичних властивостей [17, 18] та хімічного складу [3, 15] і концентрації у робочій рідині плазмоерозійних частинок металів і сплавів, які при цьому утворюються [4], дії електрофізичних і хімічних чинників імпульсного розряду [1, 6, 11, 12], але і розрахунку та оптимізації режимів роботи елементів таких систем [7, 16]. Адекватність такого моделювання, в першу чергу, визначається адекватністю електричних моделей ГСПС як найбільш складного елемента системи [6–14].

Найбільшого поширення сьогодні набули два класи моделей ГСПС. До першого належать моделі, які використовують залежність електричного опору ГСПС від прикладеної напруги $R(u)$ або від струму, що в них протікає $R(i)$ [7, 8, 13, 14]. Це так звані «нелінійні» моделі, оскільки їхнє використання призводить до описання перехідних процесів у системах з ними нелінійними диференціальними рівняннями. Вони достатньо універсальні, бо їхні коефіцієнти не залежать від параметрів реактивних елементів кіл із такими навантаженнями, а тільки від початкових умов на них [8]. Проте такі моделі у класичному вигляді без прийняття спеціальних заходів [8, 13] не враховують несиметрію залежності опору ГСПС від часу, а також її багатомодальність [9], що знижує їхню адекватність [7, 8, 13].

Найменше відоме авторам середнє за N точками значення відносних модулів різниць між результатами апроксимації аналітичними функціями залежностей еквівалентного опору ГСПС R_A від струму, що протікає в ньому, та експериментально отриманими значеннями R при незмінних початкових умовах на реактивних елементах розрядного контура системи

$$\delta[R_A, R] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| (R_{A_j} - R_j) / R_j \right|$$

складає 2,5 % [8]. У разі дискретної зміни початкових умов на реактивних елементах розрядного контура n разів у діапазоні від 23 до 250% їхніх номінальних значень найменше відоме авторам середнє значення відносних модулів різниць апроксимованих нелінійними функціями і експериментальних

значень $\bar{\delta}[[R_A, R]] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta[[R_A, R]]_j$ складає 6,86 % за умови корекції параметрів $R_A(i)$ за кожної зміни початкових умов [8].

До другого класу належать моделі, в яких використовується залежність опору ГСПС від незалежної змінної, найчастіше від часу [9, 11, 12]. У таких моделях для описання перехідних процесів використовуються диференціальні рівняння зі змінними коефіцієнтами (так звані параметричні диференціальні рівняння), тому ці моделі називаються параметричними. Вони дають змогу враховувати несиметрію залежності опору ГСПС від часу, а також її багатомодальність, внаслідок чого їхня адекватність, як правило, вища, ніж нелінійних моделей. Недоліками параметричних моделей є необхідність знаходження нових значень їхніх коефіцієнтів як при зміні початкових умов на реактивних елементах розрядного контура, так і при зміні значень цих елементів, що підвищує складність розроблення таких моделей та розрахунку перехідних процесів у колах з ними. Найменші відомі авторам значення $\delta[[R_A, R]]$ та $\bar{\delta}[[R_A, R]]$ для параметричних моделей опору ГСПС становлять 3,85 і 9,57% [9] відповідно. Така точність достатня для загального уявлення про характер перехідних процесів у розрядно-імпульсних системах з такими навантаженнями, але недостатня для визначення режимів отримання нанодисперсних плазмоерозійних частинок металів із наперед заданими властивостями [5]. Оскільки для побудови цих нелінійних [8] і параметричних [9] моделей використовувалися різні вхідні дані, то отримані результати між собою порівнювати не зовсім коректно, але представлені у [9] значення свідчать про наявність потенціалу для їхнього покращення.

Метою даної роботи є розроблення нових параметричних моделей опору ГСПС, адекватність яких підвищена завдяки використанню більш коректних методик попередньої обробки вхідних даних [10] і урахуванню додаткових особливостей залежностей опору плазмоерозійних навантажень від часу, які раніше не розглядалися, а також розрахунок перехідних процесів у них.

Розроблення уточненої параметричної моделі опору ГСПС. Для можливості порівняння адекватності простої параметричної моделі опору ГСПС із уточненою при її побудові були використані ті самі результати експериментів [9]. Однак при їх попередній обробці замість багатократного використання методу ковзного середнього [2], що призводить до так званого «завалу» переднього фронту імпульсів напруги на ГСПС та струму в них, був використаний багатоітераційний метод ковзного середнього з подвоєнням ширини вікна фільтрації на кожній наступній ітерації [10]. Новий метод порівняно з традиційним [2] майже не спотворює фронти імпульсів та дає змогу виконувати більш якісні згладжування сигналів та їхню фільтрацію від завад [10]. Крім того, для більш точного визначення тривалості перших мод експериментальних залежностей опору ГСПС від часу була використана спеціальна методика, описана у [9].

Перші моди залежностей опору ГСПС від часу $R(t)$, знайдені як результат поділу попередньо згладжених та відфільтрованих від завад за методикою, описаною в [10] залежностей від часу напруги на ГСПС та струму в них для чотирьох робочих режимів, яким відповідають амплітуди напруги на ГСПС $U_m = 169; 293; 343$ та 394 В, представлені на рис. 1, а відповідно штрих-пунктирними, суцільними, штриховими лініями та крапками. Майже всі залежності опору ГСПС від часу (рис. 1, а) мають характерну U-подібну форму, квазісиметричну відносно вертикальної осі, проведеної із точки з його мінімальним значенням. Симетрія даної залежності підвищується із збільшенням амплітуди імпульсів напруги U_m . Крім того, графіки рис. 1, а містять ділянки, на яких залежність опору ГСПС від часу незначна. Тривалість цих ділянок зменшується із збільшенням U_m .

На рис. 1, б для режиму $U_m = 293$ В показані залежності від часу наступних величин: напруги на ГСПС $u(t)$ – суцільною кривою, струму в ньому $i(t)$ – штриховою, опору $R(t)$ – крапками. Як видно з рисунку, перша мода залежності $R(t)$ містить п'ять характерних ділянок, позначених відповідними римськими цифрами, а не три, як це вважалося раніше [9]. На першій ділянці, яка у нашому випадку триває від 0 до 10 мкс, утворюються наскрізні канали провідності у шарі металевих гранул. Основні механізми їхнього виникнення – електричний пробій газової бульбашки в робочій рідині, електричний пробій робочої рідини, електричний вибух тонких провідників та електричний пробій тонких плівок.

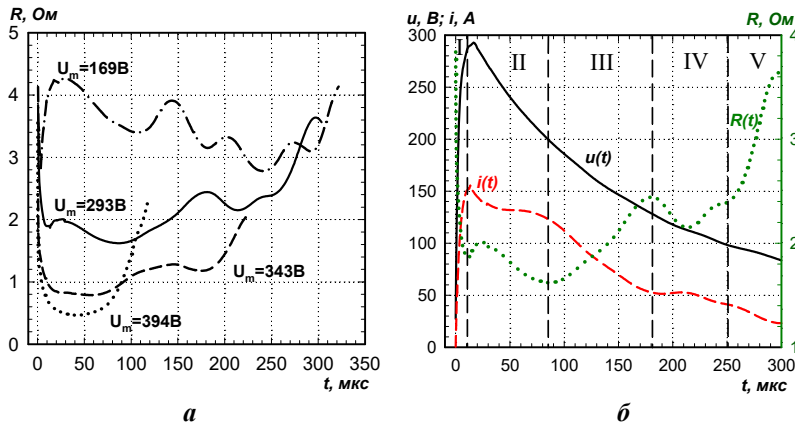


Рис. 1

збільшенням їхнього еквівалентного опору. За рахунок електрохімічної дії струму та кавітації, яка виникає при схлопуванні іскрових каналів у робочій рідині, виникає велика кількість мікробульбашок, наповнених газоподібними продуктами її розкладу та випаровування. Їх наявність у проміжку між гранулами сприяє повторному утворенню стримерних та лідерних каналів на четвертій ділянці (190–250 мкс), оскільки в газі довжина вільного пробігу носіїв заряду значно більша ніж в рідині. На цій ділянці зміна опору несуттєва при незначній зміні напруги та майже незмінному значенні струму. На п'ятій ділянці (250–300 мкс) спостерігається рекомбінація переважної більшості вільних носіїв заряду в плазмових каналах та їхнє зникнення, внаслідок чого спостерігається різке збільшення опору.

Для моделювання опору на ділянках III, IV і V у параметричній моделі [9] використовується тільки одна експонента, яка не враховувала всі наведені вище особливості електрофізичних процесів на цих ділянках. Нова апроксимаційна функція, яка відображає всі зазначені особливості, має вигляд

$$R(t) = R_0 + R_1(t) + R_2(t) + R_3(t), \quad (1)$$

де R_0 – постійна складова активного опору ГСПС; $R_1(t) = A_1 \exp(-a_1 t)$ – складова, яка відображає процеси генерації вільних носіїв заряду в плазмових каналах та визначає його поведінку на ділянках I та II, аналогічно як у [9]; $R_2(t) = \begin{cases} A_2 \exp[a_2 t] & \text{при } t < t_{III_end} \\ R_3 = \text{const} & \text{при } t > t_{III_end} \end{cases}$ – складова, що відображає процеси рекомбінації вільних носіїв заряду в плазмових каналах, які переважають на ділянці III, та збільшення його постійної складової на ділянці IV; $R_3(t) = A_3 \exp[a_3 t]$ – складова, яка відображає процеси рекомбінації вільних носіїв заряду в плазмових каналах на ділянці V; t_{III_end} – час закінчення ділянки III залежності опору ГСПС від часу та перехід до ділянки IV. З математичної точки зору в момент t_{III_end} у моделі (1) має місце розрив першого роду.

Для $n = 7$ режимів, які характеризуються різними амплітудами імпульсів напруги на ГСПС, у табл. 1 наведено значення відносних модулів різниць між результатами апроксимації та експериментів $\delta[R_A, R]$, а також оптимальні за критерієм мінімуму $\delta[R_A, R]$ значення параметрів апроксимуючої функції (1). Для їхнього пошуку була використана методика, яка застосовувалась у [9] і детально описана у [8]. При знаходженні оптимальних значень параметрів (1) враховувалась також вимога максимального забезпечення монотонності їх залежності від U_m . Це дещо підвищило $\delta[R_A, R]$ у порівнянні з методикою, коли для кожного режиму, який характеризується U_m , значення параметрів (1) знаходилися без урахування інших режимів.

Найменше наведене в табл. 1 значення $\delta[R_A, R] = 3,74\%$ спостерігається для режиму, коли $U_m = 240$ В, що менше найменшого значення $\delta[R_A, R] = 3,95\%$ за даними [9]. Середнє за даними табл. 1 значення $\bar{\delta}[R_A, R] = 5,55\%$, що значно менше аналогічного показника за даними [9]

На другій ділянці (у нашому випадку 10–90 мкс) у шарі гранул формуються розвинені плазмові канали, в тому числі й іскрові [9]. При збільшенні амплітуди напруги на навантаженні стрибок опору на границі ділянок I та II поступово зменшується. При $U_m \geq 394$ В залежність опору на границі вказаних ділянок стає монотонною.

На третій ділянці (90–190 мкс) переважно відбуваються згасання більшості розвинених плазмових, в тому числі іскрових, каналів у шарі гранул, що підтверджується

$\bar{\delta}[[R_A, R]] = 9,57\%$. Тобто, нова уточнена модель дає змогу покращити середні значення параметрів нев'язки апроксимації у 1,7 рази, а найкращі – в 1,1 рази.

Таблиця 1

U_m, B	Значення параметрів апроксимуючої функції (1)								$\delta[[R_A, R]], \%$
	$R_0, Ом$	$A_1, Ом$	$a_1, 1/c$	$A_2, Ом$	$a_2, 1/c$	$R_{03}, Ом$	$A_3, Ом$	$a_3, 1/c$	
169	2,750	1,650	8100	5,850E-05	30500	0,200	7,266E-06	36932	6,26
240	2,748	2,000	63500	1,281E-03	33274	1,370	7,968E-06	34590	3,74
293	1,613	1,700	91000	2,401E-03	34359	0,770	7,838E-06	40638	5,97
343	0,759	1,425	154000	1,720E-03	48900	0,441	5,000E-07	63500	4,62
356	0,641	1,417	161067	1,477E-03	54733	0,610	7,502E-08	71229	5,40
364	0,581	1,415	164184	1,385E-03	58508	0,949	6,819E-08	78000	7,48
394	0,452	1,414	169000	1,286E-03	63986	1,203	6,814E-08	135647	5,37

в табл. 1, а штриховими – складові функції (1).

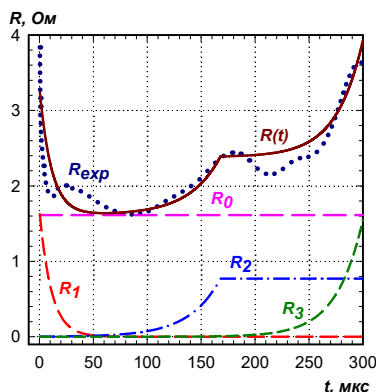


Рис. 2

Для апроксимації дискретно заданих у залежності від амплітуди імпульсів напруги U_m значень параметрів функції (1), наведених у табл. 1, були використані функції, наведені в табл. 2.

При знаходженні оптимальних значень їхніх коефіцієнтів використовувалися наступні критерії: 1) мінімального значення відносного стандартного відхилення оцінки експериментальних y_j і апроксимованих y_{Aj} значень для N точок залежності:

$$\nu[y, y_A] = \sqrt{N \cdot \sum_{j=1}^N (y_j - y_{Aj})^2} / \sum_{j=1}^N y_j; \quad 2) \text{ мінімального значення середньої суми модулів відносних похибок експериментального і апроксимованого значень: } \delta[y, y_A] = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |(y_j - y_{Aj}) / y_j|;$$

3) мінімального значення інтегрального параметра нев'язки апроксимації: $\beta_2[y, y_A] = (\nu[y, y_A] + \delta[y, y_A]) / 2$ згідно з методикою, описаною в [8]. Отримані значення параметрів нев'язки апроксимацій $\nu[y, y_A]$, $\delta[y, y_A]$ та $\beta_2[y, y_A]$ також наведено у табл. 2, а оптимальні за критерієм мінімуму $\delta[y, y_A]$ значення коефіцієнтів апроксимуючих функцій C_j з табл. 2 – у табл. 3.

На рис. 2 для режиму, коли $U_m=293$ В, точками показана залежність опору навантаження від часу, яка отримана після попередньої обробки експериментальних даних: суцільною кривою – її апроксимація функцією (1) із значеннями параметрів, наведеними

Таблиця 2

Параметр	Апроксимуюча функція	$\delta[[y, y_A]], \%$	$\nu[[y, y_A]]$	$\beta_2[[y, y_A]]$
R_0	$C_1(C_2U_m - C_3)^2 \cdot \exp(-C_4(C_2U_m - C_3)^3) + C_5$	2,1628	0,0190	0,0203
A_1	$(C_1 - (C_2U_m - C_3)) / (C_4 + (C_2U_m - C_3)^2) + C_5$	0,0774	0,0013	0,0010
a_1	$C_1(C_2U_m - C_3) \cdot \exp(-C_4(C_2U_m - C_3)^2) + C_5 \cdot \exp(-C_6(C_7U_m - C_8)^4) + C_9$	0,7786	0,0088	0,0083
A_2	$C_1(C_2U_m - C_3)^5 \cdot \exp(-C_4(C_2U_m - C_3)^2) + C_5$	2,1216	0,0241	0,0227
a_2	$C_1(C_2U_m - C_3)^{11} \cdot \exp(-C_4(C_2U_m - C_3)^{12}) + C_5(C_6U_m - C_7)^3 \cdot \exp(C_8(C_6U_m - C_7)^4) + C_9$	0,7501	0,0156	0,0115
R_3	$C_1(C_2U_m - C_3)^3 \cdot \exp(-C_4(C_2U_m - C_3)^2) + C_5(C_6U_m - C_7)^5 \cdot \exp(-C_8(C_6U_m - C_7)^2) + C_9$	0,8448	0,0137	0,0111
A_3	$C_1 \cdot \exp(-(C_2U_m - C_3)^8) + C_4$	6,0455	0,0164	0,0384
a_3	$C_1 \cdot \exp(C_2U_m) - C_4 \cdot \exp(-(C_4U_m - C_5)^4) + C_6$	1,5835	0,0264	0,0211

Таблиця 3

Параметр	Значення коефіцієнтів C_j апроксимуючих функцій								
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
R_0	5,1851	0,0057	0,1609	0,6645	0,3955	–	–	–	–
A_1	3,6793	0,0749	20,2569	6,1551	1,4747	–	–	–	–
a_1	1,77E+06	0,1466	24,6919	0,0540	1,69E+05	2,1626	0,0054	2,3244	2,34E-10
A_2	6,02E-05	0,0416	9,6754	0,2663	0,0013	–	–	–	–
a_2	63,1925	0,0050	1,02E-04	3,51E-04	6,6208	0,1383	23,8833	1,1E-04	3,05E+04
R_3	2,7837	0,0120	1,5890	0,7334	50,9431	0,0143	4,6795	3,8692	2,20E-04
A_3	7,90E-06	0,0108	2,5607	6,81E-08	–	–	–	–	–
a_3	0,0053	0,0419	2,15E+04	0,0105	2,3670	5,59E+04	–	–	–

Simulink – модель генератора розрядних імпульсів з параметричним навантаженням.

Для розрахунку перехідних процесів у вихідному колі генератора розрядних імпульсів із плазморозійним навантаженням, опір якого описується параметричною залежністю (1) із значеннями параметрів, наведеними в табл. 1, було розроблено його Simulink-модель, графічне зображення якої для замкненого стану розрядного ключа представлено на рис. 3.

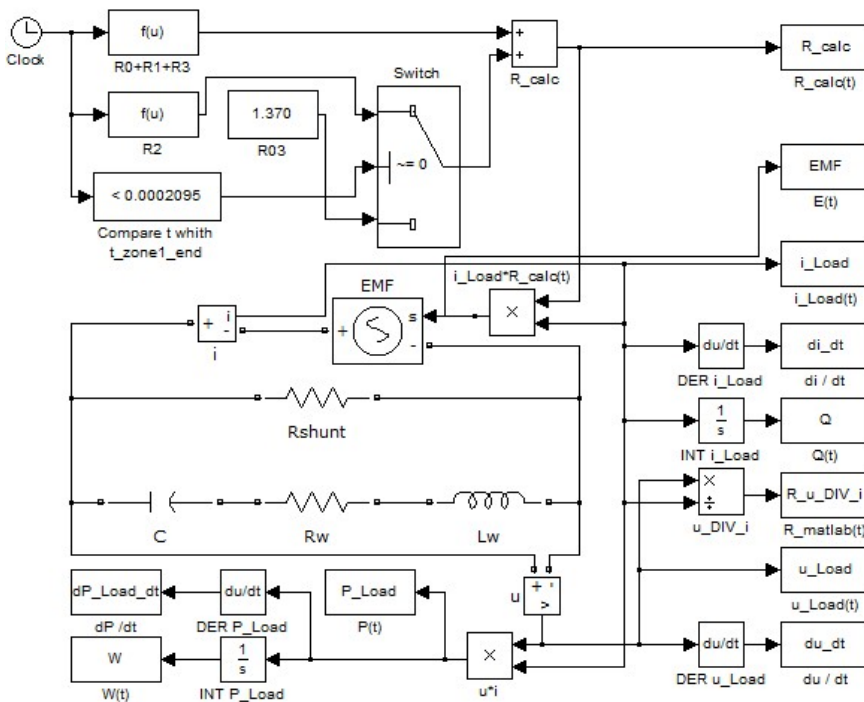


Рис. 3

мопровідного середовища, що знаходиться в розрядній камері, здійснюється шляхом моделювання падіння напруги на ньому. З цією метою в схемі на рис. 3 паралельно робочому конденсатору C у напрямку, протилежному напрямку протікання струму, включено кероване джерело ЕРС, яке позначено на схемі EMF . Формування сигналу керування для EMF виконується елементами $Clock$, $R_0+R_1+R_3$, R_2 , R_03 , $Compare\ t\ with\ t_{zone\ 1_end}$, $Switch$, R_calc , $i_load * R_calc$.

Алгоритм його розрахунку наступний. Значення моменту часу на поточному кроці моделювання, отримане з використанням елемента $Clock$, використовується блоками $R_0+R_1+R_3$ та R_2 для розрахунку складових опорів розрядної камери, які потім підсумовуються блоком R_calc . У момент часу, якому відповідає завершення зони III опорів ГСПС (рис. 2), відбувається миттєве перемикання

Під час розробки Simulink-моделі були використані стандартні блоки бібліотек Simulink та SimPowerSystems. Робочий конденсатор генератора імпульсів моделюється ідеальним конденсатором C . Активний лінійний опір R_w моделює втрати в розрядному контурі та представляє собою суму активних опорів замкненого розрядного ключа та з'єднувальних кабелів. Ідеальна котушка індуктивності L_w моделює індуктивність з'єднувальних проводів і замкненого ключа. Опір резистора, який шунтує навантаження, моделюється з застосуванням активного лінійного опору R_{shunt} .

Врахування опору всього гранульованого стру-

ідеального ключа *Switch*, в результаті цього на один із входів суматора R_calk замість складової опору, розрахованої блоком $R2$, подається її значення, розраховане блоком $R03$. Керування ідеальним вимикачем здійснюється блоком *Compare t whit t_zone_1_end* порівнянням значення часу на поточному кроці розрахунку з попередньо встановленим значенням часу закінчення зони III опору ГСПС. Зазначена процедура дає змогу врахувати наявність декількох характерних зон опору розрядної камери.

Стандартні блоки *ToWorkspace* бібліотеки Simulink/Sinks використовуються для подання величин, що моделюються, в табличному вигляді та імпорту їх в інші програмні пакети для подальшого аналізу. Так, на схемі, показаній на рис. 3, для отримання залежностей від часу величин напруги на навантаженні, струму, потужності та енергії в ньому, а також заряду, що пройшов через навантаження, використовуються блоки u_Load , i_Load , P_Load , W та Q відповідно. Для отримання залежностей від часу похідних напруги на навантаженні, струму і потужності в ньому – блоки du_dt , di_dt , dP_Load_dt . Блоки, з використанням яких здійснюються операції взяття похідних, містять у позначеннях префікси *DER*, інтегрування – *INT*, ділення – *DIV*, множення – *PR*.

Розрахунок перехідного процесу розряду робочого конденсатора C на параметричне навантаження за час першої моди параметричної залежності опору проводився для семи режимів, яким відповідають значення амплітуди напруги на навантаженні, наведені у табл. 1. На рис. 4 представлено його результати для режиму, в якому амплітуда імпульсів напруги становить 293 В: штриховими лініями – дані, отримані в результаті експериментів, а суцільними – результати моделювання у пакеті Simulink.

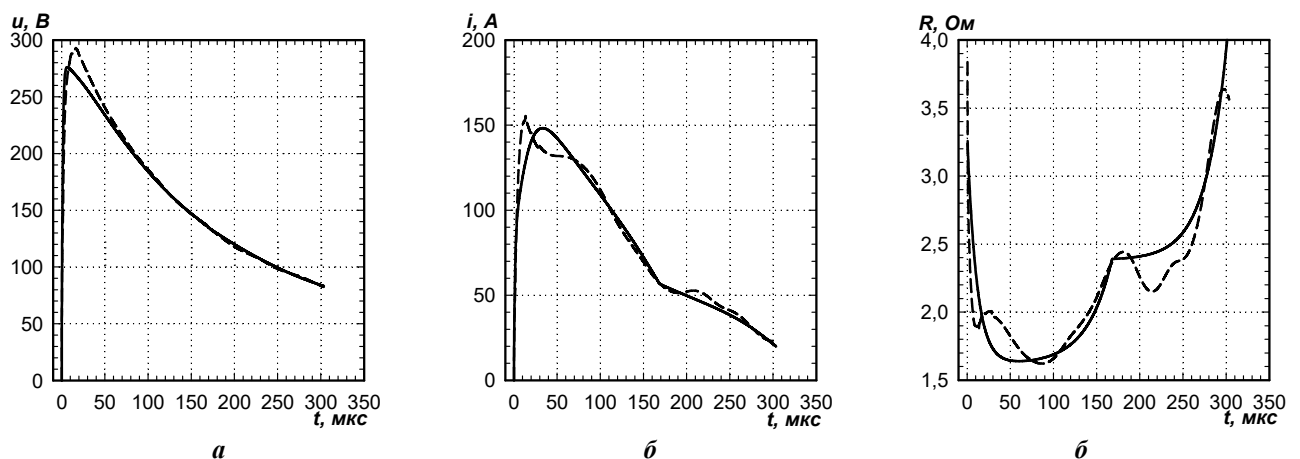


Рис. 4

Оцінка адекватності запропонованої Simulink-моделі вихідного кола генератора розрядних імпульсів із плазмоерозійним навантаженням виконувалася на основі порівняння залежностей від часу струму в навантаженні $i(t)$, напруги на ньому $u(t)$, його опору $R(t)$, а також потужності $P(t)$, енергії $W(t)$ та заряду $Q(t)$, розрахованих на підставі експериментальних даних $y(t)$ та із застосуванням запропонованої Simulink-моделі $y_C(t)$. Знайдені таким чином значення середньої суми модулів відносної похибки моделювання $\delta[y(t), y_N(t)]$ наведено в табл. 4.

Як видно з табл. 4, при зміні амплітуди напруги, прикладеної до навантаження в діапазоні від 169 до 356 В включно, результати моделювання демонструють прийнятний збіг із експериментальними даними. Слід зазначити, що під час розрахунку параметрів функції (1), яка апроксимує залежність $R(t)$ з використанням аналітичних функцій з табл. 2, в деяких точках збільшується похибка їхньої апроксимації гладкими функціями. Це спостерігається, наприклад, у режимі роботи, якому відповідає амплітуда імпульсу напруги 364 В. Це, у свою чергу, призводить до збільшення похибок моделювання залежностей від часу напруги, струму та опору, а також інтегральних характеристик розрядних імпульсів (P_{cp} , W_{max} , Q_{max}) внаслідок збільшення похибки визначення параметрів A_2 та A_3 функції $R(t)$.

Таблиця 4

U_m B	$\delta[y(t), y_N(t)], \%$								
	$u(t)$	$i(t)$	$R(t)$	$P(t)$	$W(t)$	$Q(t)$	P_{cp}	W_{max}	Q_{max}
169	1,95	6,16	6,26	7,28	6,48	3,54	2,47	2,32	0,36
240	1,55	3,80	3,74	4,81	6,27	2,87	3,50	3,36	0,89
293	1,80	5,21	5,97	5,29	4,29	2,35	2,09	1,93	0,28
343	2,31	4,01	4,62	4,84	6,49	4,40	2,35	2,57	2,58
356	2,79	5,13	5,40	7,48	6,57	3,98	0,45	0,67	0,28
364	4,70	7,27	7,48	10,24	14,34	10,99	13,82	13,70	9,90
394	5,54	6,48	5,37	10,54	16,64	8,12	8,98	9,17	5,16

хунки перехідних процесів у розрядному контурі генератора імпульсів із плазмоерозійним навантаженням, а також їхніх динамічних та енергетичних параметрів із достатньою для інженерних розрахунків точністю.

Висновки. 1. Вперше виявлено та описано явище повторного виникнення стримерних і лідерних плазмових каналів після згасання переважної більшості плазмових каналів, які утворилися в рамках першої моди залежності опору плазмоерозійного навантаження від часу, в результаті чого обґрунтовано існування двох додаткових характерних ділянок в її межах.

2. З урахуванням цих двох нових ділянок першої моди побудовано її уточнену параметричну модель. Використання цієї моделі замість простої параметричної моделі, яка враховувала тільки три характерні ділянки, дає змогу зменшити середнє для всіх досліджених режимів значення відносної похибки моделювання опору з 9,57 до 5,54%, тобто майже у 2 рази підвищити точність прогнозування режимів отримання плазмоерозійних частинок металів із наперед заданими властивостями.

3. Представлення аналітичними функціями залежності параметрів функції, яка апроксимує параметричну залежність опору плазмоерозійного навантаження від амплітуди імпульсів прикладеної напруги, забезпечила підвищення адекватності його уточненої параметричної моделі на ділянках між вимірними значеннями напруги та розширити діапазон зміни амплітуд імпульсів напруги, в якому її можна використовувати.

1. Гончарук В.В., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Косинова В.Н. Дезинфицирующее действие объёмного электроискрового разряда в воде. *Химия и технология воды*. 1999. № 3. Т. 21. С. 328–336.

2. Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А. Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь, 1997. 112 с.

3. Даниленко Н.Б., Галанов А.И., Корнев Я.И., Балухтин П.В., Шиян Л.Н., Юрмазова Т.А., Яворовский Н.А., Савельев Г.Г. Применение импульсных электрических разрядов в водных растворах для получения наноматериалов и их использование для очистки воды. *Нанотехника*. 2006. № 4(8). С. 81–90.

4. Жильцов А.В., Коробський В.В., Лапшин С.О., Олішевський В.В. Використання електротехнічного комплексу для отримання нано- і мікропорошків металів. *Наук. вісн. НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК»*. 2018. Т. 268. С. 189–196.

5. Захарченко С.Н., Кондратенко И.П., Перекос А.Е., Залуцкий В.П., Козырский В.В., Лопатько К.Г. Влияние длительности разрядных импульсов в слое гранул железа на размеры и структурно-фазовое состояние его электроэрозийных частиц. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 6. № 5 (60). С. 66–72.

6. Кучерявая И.Н. Мультифизические процессы при электроискровой обработке токопроводящих гранул. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 5. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.032>

7. Шидловская Н.А., Захарченко С.Н., Черкасский А.П. Анализ электромагнитных процессов в выходной цепи генератора разрядных импульсов с нелинейной моделью плазмозероэрозийной нагрузки при изменении их параметров в широких диапазонах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 87–95. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.087>

8. 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.

Усереднене для 7 розглянутих режимів роботи значення похибки розрахунку напруги не перевищує 3%, струму та опору – 5,5%, потужності, енергії та заряду в кожний момент часу – 7,2%, 8,7%, та 5,2% відповідно. Аналогічно, усереднені похибки розрахунку середньої потужності за час існування першої моди залежності від часу опору P_{cp} , а також енергії, що виділилася в навантаженні W_{max} , не перевищують 5%, а заряду, що пройшов через навантаження Q_{max} – 3%. З наведеного вище випливає, що запропонована модель дає змогу проводити розра-

9. 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>

10. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Порівняння ефективності згладжування сигналів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому багатоітераційними методами фільтрації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 4. С. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.003>

11. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Исследование электроэрозионных явлений при протекании импульсного тока между токопроводящими гранулами с учетом плазменного контактного промежутка. *Технічна електродинаміка*. 2002. № 4. С. 3–7.

12. Щерба А.А., Супруновская Н.И. Циклические переходные процессы в цепях электроразрядных установок с учетом влияния скорости нарастания разрядных токов и паузы между ними на сопротивление нагрузки. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.003>

13. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 3. С. 12–18.

14. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления электроискровой нагрузки с учетом его изменения при протекании и отсутствии разрядного тока в нагрузке. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 23–25.

15. Kornev Ia., Osokin G., Galanov A., Yavorovsky V., Danilenko N. Pulsed Electrical Discharges in a Layer of Metallic Pieces and their Application for Water Treatment. *Third International Forum on Strategic Technologies. High Voltage Research Institute of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*. 2008. Pp. 516–518.

16. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>

17. Liu Y., Li X., Li Y., Zhao Zh., Bai F. The lattice distortion of nickel particles generated by spark discharge in hydrocarbon dielectric mediums. *Applied Physics A*. 2016. Vol. 122. Pp. 174-1 – 174-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9698-2>

18. 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://dx.doi.org/10.1063/1.4764017>

УДК 621.3.011.72: 621.3.014.14

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СРЕД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УТОЧНЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ИХ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ

Н.А. Шидловская, чл.-корр. НАН Украины, **С.Н. Захарченко**, докт.техн.наук, **А.П. Черкасский**, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net, cherkassky_a@ukr.net

Исследованы зависимости от времени сопротивления плазмоэрозионной нагрузки. Впервые выявлено два новых характерных участка первой моды этой зависимости. В результате их анализа обосновано явление повторного возникновения стримерных и лидерных плазменных каналов после затухания большинства возникших ранее плазменных каналов. С учетом двух новых характерных участков первой моды зависимости сопротивления плазмоэрозионной нагрузки от времени создана ее уточненная параметрическая модель. Найдены оптимальные по критериям трех основных параметров невязки аппроксимации значения параметров этой модели. Предложены функции, аппроксимирующие зависимости этих параметров от амплитуды импульсов напряжения, приложенного к нагрузке, и найдены оптимальные значения их коэффициентов. В программном пакете Mathlab Simulink создана модель разрядно-импульсной системы с уточненной параметрической моделью плазмоэрозионной нагрузки и рассчитаны переходные процессы в ней. Дана оценка адекватности моделирования переходных процессов по сравнению с реальными процессами. Библиограф. 18, рис. 4, табл. 4.

Ключевые слова: плазмоэрозионная нагрузка, параметрическая модель, разрядно-импульсная система, переходные процессы, адекватность.

MODELING OF TRANSIENTS IN A DISCHARGE-PULSE SYSTEM FOR PROCESSING GRANULATED CONDUCTIVE MEDIA USING A REFINED DEPENDENCE OF THEIR RESISTANCE ON TIME

N.A. Shydlovskaya, S.M. Zakharchenko, O.P. Cherkaskiy

Institute of Electrodynamic National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: shydlovskaya@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net, cherkassky_a@ukr.net

The time dependences of the resistance of plasma-erosive load are investigated. For the first time, two new characteristic areas of the first mode of this dependence were revealed. As a result of their analysis, the phenomenon of re-appearance of streamer and leader plasma channels after the disappearance of most of the previously formed plasma channels has been substantiated. Taking into account two new characteristic areas of the first mode, the dependence of the resistance of the plasma-erosive load on time, its refined parametric model was created. The values of the parameters of this model that are optimal by the criteria of the three main parameters of the residual of the approximation are found. Functions that approximate the dependence of these parameters on the amplitude of the voltage pulses applied to the load are proposed and the optimal values of their coefficients are found. In the Matlab Simulink software package a model of a discharge-pulse system with a refined parametric model of plasma-erosive load was created and transients in it were calculated. An assessment is made of the adequacy of transient simulation compared with real processes. References 18, figures 4, tables 4.

Key words: plasma-erosive load, parametric model, discharge-pulse system, transients, adequacy.

1. 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 tekhnologiya vody*. 1999. No 3. Vol. 21. Pp. 328–336. (Rus)
2. Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A. Mathematical methods of construction of prognoses. Moskva: Radio i Sviaz, 1997. 112 p. (Rus)
3. Danilenko N.B., Galanov A.I., Kornev Ya.I., Balukhtin P.V., Shyian L.N., Yurmazova T.A., Yavorovskii N.A., Savelev G.G. Application of pulsing electric discharges in aqueous solutions for production of nano-size materials and their use for water purification. *Nanotekhnika*. 2006. No 4(8). Pp. 81–90. (Rus)
4. Zhiltsov A.V., Korobskiy V.V., Lapshin S.O., Olishevskiy V.V. Use of the electrotechnical complex for nano and micro-powders of metal. *Science Journal of NUBiP Ukraine*. A series of Technology and energy in agriculture. 2018. Vol. 268. Pp. 189–196. (Ukr)
5. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.E., Zalutsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. The influence of the duration of discharge pulses in the layer of iron granules on the size and structural-phase state of its electric-erosion particles. *East-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. Vol. 6. No 5 (60). Pp. 66–72. (Rus)
6. Kucheriava I.M. Multiphysics processes at spark erosion treatment of conducting granules. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 5. Pp. 32–38. (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.032>
7. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkassky A.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>
8. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkassky A.P. Non-linear-parametrical Model of Electrical Resistance of Conductive Granulated Media for a Wide Range of Applied Voltage. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 6. Pp. 3–17. (Rus)
9. 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>
10. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskiy O.P. Comparison of the smoothing efficiency of signals of voltage on the plasma-erosive load and its current by multi-iterative filtration methods. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 3–13. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.003>
11. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. Research of the electro-erosive phenomena at a flow of a pulsing current between conductive granules taking into account a plasma contact gap. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2002. No 4. Pp. 3–7. (Rus)
12. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Cyclic transients in the circuits of electric discharge installations taking into account the influence of magnitude and rate of discharge currents rise on resistance of electric spark load. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 3–10 (Rus) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.003>
13. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load for synthesis of discharge circuit of capacitor by time parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 3. Pp. 12–18. (Rus)
14. Shcherba A.A., Suprunovskaya N.I., Ivashchenko D.S. Modeling of nonlinear resistance of electro-spark load taking into account its changes during discharge current flowing in the load and at zero current in it. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2014. No 5. Pp. 23–25 (Rus)
15. Kornev Ia., Osokin G., Galanov A., Yavorovskiy V., Danilenko N. Pulsed Electrical Discharges in a Layer of Metallic Pieces and their Application for Water Treatment. *Third International Forum on Strategic Technologies. High Voltage Research Institute of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*. 2008. Pp. 516–518.
16. Kornev Ia., Saprykin F., Lobanova G., Ushakov V., Preis S. Spark erosion in a metal spheres bed: Experimental study of the discharge stability and energy efficiency. *Journal of Electrostatics*. 2018. Vol. 96. Pp. 111–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2018.10.008>
17. Liu Y., Li X., Li Y., Zhao Zh., Bai F. The lattice distortion of nickel particles generated by spark discharge in hydrocarbon dielectric mediums. *Applied Physics A*. 2016. Vol. 122. Pp. 174-1 – 174-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9698-2>
18. 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://dx.doi.org/10.1063/1.4764017>.

Надійшла 29.11.2018
Остаточний варіант 18.02.2019