

УДК 621.3.011.72: 621.3.014.14

**ФІЗИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ПЛАЗМОЕРОЗІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

**Н.А. Шидловська** чл.-кор. НАН України, **С.М. Захарченко**, докт.техн.наук, **О.П. Черкаський**  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,  
E-mail: [shydlovska@mail.ua](mailto:shydlovska@mail.ua), [snzakhar@bk.ru](mailto:snzakhar@bk.ru), [cherkassky\\_a@ukr.net](mailto:cherkassky_a@ukr.net)

*Розглянуто особливості впливу фізичних процесів, що відбуваються при протіканні імпульсних електричних струмів у багатоканальних плазмоерозійних навантаженнях, на форму струмів та на вигляд параметричної і нелінійної залежностей еквівалентного опору таких навантажень. Наведено порівняльний аналіз адекватності та сфер застосування параметричних і нелінійних моделей еквівалентного електричного опору плазмоерозійних навантажень. Показано, що урахування багатомодальності імпульсних струмів можливе лише при використанні параметричних та стохастично-параметричних моделей опору плазмоерозійних навантажень. Показано, що застосування параметричних моделей таких навантажень більш доцільно за умов великих значень та незначної зміни сталої часу перехідного процесу або періоду власних коливань кіл з ними.*

Бібл. 30, рис. 5.

**Ключові слова:** плазмоерозійне навантаження, розрядний струм, параметрична модель, нелінійна модель, адекватність.

**Вступ.** Електричний опір плазмоерозійних навантажень головним чином визначається опором плазмових каналів, які виникають між електродами (у більшості випадків металевими) в результаті підведення до них напруги. Якщо розряд відбувається в газі, плазмові канали оточені газовим середовищем, а якщо в рідині – парогазовим, яке миттєво виникає в результаті випаровування рідини під тепловою дією електричного струму [22] або в результаті її електрохімічного розкладення внаслідок його гальванічної дії [18]. У будь-якому випадку електричний опір середовища, яке оточує плазмові канали, на порядки вищий опору самих каналів і основна частина енергії виділяється саме в них. У результаті її виділення спостерігається термічна та електрична ерозія поверхні електродів, що і дало назву такому класу навантажень. Ерозія електродів є одним із чинників, який спричиняє еволюцію і міграцію плазмових каналів та призводить до зміни умов їхнього утворення, внаслідок чого процеси в таких навантаженнях є нестационарними та нелінійними. Тобто плазмоерозійні навантаження є окремим випадком нелінійних нестационарних навантажень.

Плазмоерозійні навантаження можуть містити як одну пару, так і багато електродів і одночасно існуючих плазмових каналів між ними. Одним із прикладів багатоканальних плазмоерозійних навантажень є гранульовані струмопровідні середовища [11] при прикладанні до них імпульсної електричної напруги. В таких середовищах реалізуються наступні сучасні технологічні процеси: 1) виробництво дисперсних порошків багатокомпонентних, тугоплавких, магнітних та інших сплавів [24, 28, 29]; 2) отримання гідрозолів біологічно активних металів (*Ag, Cu, Zn, Fe, Co, Mn, Mo, Mg*) з нанодисперсною фазою [12]; 3) очищення та знезараження поверхневих та стічних вод [1, 8, 25]. Для технологій третьої групи використовуються гранули металів, які в результаті хімічної взаємодії з водою здатні утворювати коагулянт – *Al* або *Fe*.

В залежності від стану поверхні електродів, відстані між ними та електрофізичних параметрів середовища, що їх оточує, можливі чотири основні типи механізмів виникнення плазмових каналів у таких структурах [9]: 1) електротермічне руйнування мікроступів електродів, які утворюють омичні контакти [13]; 2) електричний пробій плівок із низькою електропровідністю на поверхні електродів, які знаходяться в механічному контакті [2]; 3) електротермічне чи електрохімічне виникнення газових пухирів у рідині між електродами з наступним їх електричним пробоем [17] або пробій газового проміжку [15]; 4) імпульсний іонізаційний електричний пробій рідин [17]. Велика кількість механізмів виникнення плазмових каналів та особливостей їх еволюції [9, 17] призводить до появи різних

видів математичних моделей, що описують перехідні електромагнітні процеси в таких середовищах. Найбільш поширеними з яких є нелінійні [6, 14, 20] та параметричні [7, 30]. Кожний з цих видів моделей відображає лише певні особливості перехідних процесів у таких середовищах, а не процеси в цілому, що недостатньо повно висвітлено у науковій літературі.

**Метою даної роботи є** визначення фізичних передумов побудови моделей опору плазмоерозійних навантажень і порівняння адекватності та сфер застосування їх різних типів.

**Характеризація отриманих у ході експериментів даних, які є основою для побудови моделей плазмоерозійних навантажень.** У разі, якщо в основу побудови електричних моделей плазмоерозійних навантажень покладені результати експериментів, то, як правило, такими даними є синхронні осцилограми напруги на них та їхнього струму. Зняті в ході прямих експериментів з шаром гранул алюмінію у водопровідній воді синхронні осцилограми напруги і струму в ньому представлені на рис. 1. Методика експериментів описана в [6]. Гранули алюмінію були квазісферичної форми діаметром  $d=4$  мм, поверхня яких пройшла попередню плазмоерозійну обробку. Ширина шару гранул становила  $b=22$  мм, висота  $h=30$  мм, а довжина  $l=52$  мм. Проток води був направлений знизу вгору і становив  $Q=6$  мл/с. Ємність розрядного конденсатора становила  $C=200$  мкФ, індуктивність розрядного контура  $L=1,8$  мкГн, опір резистора, який шунтував навантаження [8] з метою запобігання аварійним режимам [6], становив  $R_{III}=3$  Ом, а частота повторення розрядних імпульсів встановлювалася  $f=5$  Гц.

З форми осцилограм на рис. 1 видно, що як струм багатоканального плазмоерозійного навантаження, так і напруга на ньому зазнали стохастичної високочастотної (з періодом менше 10 мкс) амплітудної модуляції, коефіцієнт якої [3], судячи з графіків, може досягати 50% для струму і 30% для напруги. Це викликано, насамперед, різноманіттям умов та механізмів виникнення каналів електропровідності між поверхнями сусідніх гранул [9] та їх великою кількістю в шарі (близько 500 шт.), що зумовлює стохастичний характер [10] процесів утворення, еволюції, міграції по поверхні гранул та зникнення плазмових каналів.

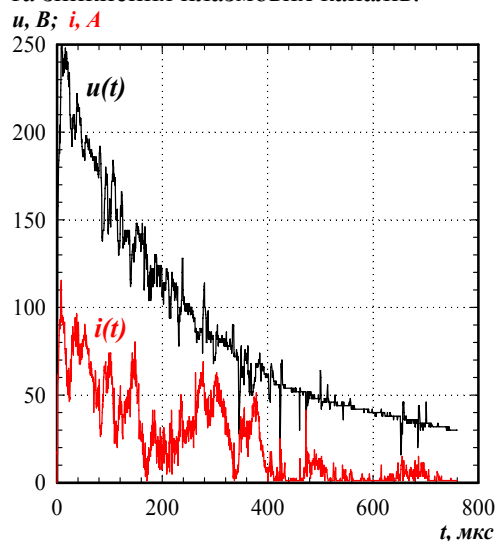


Рис. 1

Крім того, навіть основний тренд струму містить кілька мод тривалістю від кількох десятків до двох сотень мікросекунд. Останні спричинені тенденціями виникнення, розвитку та зникнення груп плазмових каналів у певних зонах шару гранул та електротермічною ерозією їхньої поверхні. Форма першої моди основного тренда імпульсів розрядного струму в плазмоерозійному навантаженні (рис. 1) відрізняється від форми струму, який виникає при розряді конденсатора на еквівалентне активне лінійне навантаження. Це спричинено нелінійною [6, 20] та параметричною [7] залежностями опору плазмоерозійного навантаження. При збільшенні значень прикладеної до шару гранул напруги і, як наслідок, струму, що протікає в ньому, збільшуються кількість плазмових каналів, площа їхнього поперечного перерізу та ступінь іонізації [6, 9, 20]. Всі ці фактори призводять до зменшення еквівалентного опору шару гранул, нелінійна залежність від струму або напруги якого добре апроксимується функціями на основі степеневих із показником степеня  $-1$  [6, 20]. Збільшення початкової напруги на розрядному конденсаторі призводить до збільшення амплітудних значень імпульсів напруги і струму, а також до істотної зміни форми їхнього основного тренда [20].

Розглянуті вище особливості електрофізичних процесів імпульсної плазмоерозійної обробки шару металевих гранул призводять до стохастичних змін тривалості та форми розрядних імпульсів у плазмоерозійному навантаженні [20], у результаті чого в загальному випадку такі сигнали є неперіодичними нестационарними і недетермінованими [5] навіть за повністю однакових початкових умов на реактивних елементах розрядного контура [6, 8] та фіксованій частоті повторення розрядних імпульсів. Крім того, в сигналі, що вимірюється осцилографом, завжди присутні електромагнітні завади, спричинені роботою силових вузлів блоків генератора, іншої радіоелектронної апаратури та електричних машин. Тому при створенні адекватних моделей плазмоерозійного навантаження, входними даними для яких є синхронні осцилограми напруги та струму в ньому, вкрай необхідна їхня попередня обробка.

Якщо при побудові моделей плазмоерозійного навантаження не планується окремо розглядати високочастотні стохастичні флуктуації його опору, спричинені виникненням, міграцією та згасанням плазмових каналів, то одним із найефективніших методів їхнього згладжування є усереднення великої кількості осцилограм, знятих у квазіоднакових умовах. Зазначимо, що забезпечити вибірку нескінченної потужності знятих в абсолютно однакових умовах імпульсів напруги на плазмоерозійному навантаженні та струму в ньому неможливо, оскільки внаслідок процесів ерозії металевих гранул фізичні і електричні параметри його шару в робочій рідині постійно змінюються [21]. Тому важливим є дотримання компромісу між збільшенням кількості результатів вимірювання та збереженням їх умов однаковими. Як показали попередні дослідження [21], для гранул алюмінію у воді умови процесу їхнього плазмоерозійного оброблення можна вважати однаковими (середнє значення опору змінюється менше ніж на 1%), якщо сумарна питома енергія імпульсів в їхньому шарі не перевищує 0,5 Дж/кг у рамках одного циклу вимірювання, і квазіоднаковими (середнє значення опору змінюється менше ніж на 5%), якщо вона не перевищує 2,5 Дж/кг. Згідно з методикою, описаною в [6], у першому випадку для режимів, що розглядаються, можна зняти до 30 синхронних пар осцилограм, що цілком достатньо для їхнього ефективного усереднення.

*u, B; i, A*

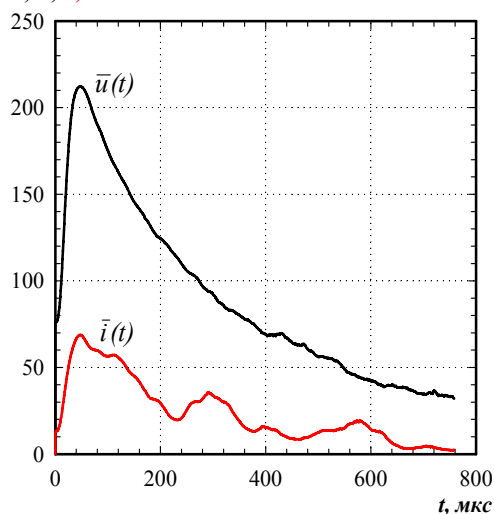


Рис. 2

рація сигналів від високочастотних флуктуацій і завад у разі зменшує похибки їхньої апроксимації аналітичними функціями при побудові математичних моделей навантаження.

Якщо для фільтрації вхідних сигналів використовуються локальні перетворення [16], в яких формування кожного елемента (відліку у часі) обробленого сигналу є результатом функції від певної множини сусідніх елементів вхідного сигналу, наприклад, методи ковзного середнього або ковзної медіани [19], то глибина фільтрації регулюється шириною її вікна та числом ітерацій. Зазначимо, що із зростанням глибини фільтрації зменшуються амплітуди високочастотних складових сигналу, що зменшує похибки апроксимації його основного тренда аналітичними функціями, але зростають і спотворення сигналу, наприклад, так званий «завал фронтів», тобто істотне зменшення модуля першої похідної сигналу на його початку або наприкінці. Тому завжди потрібно шукати компроміс між цими тенденціями.

Серед методів фільтрації, що базуються на точкових перетвореннях, в яких обробка кожного елемента вхідного сигналу виконується незалежно від його сусідніх елементів, [16] для нестационарних неперіодичних сигналів, якими є напруга на плазмоерозійному навантаженні та струм у ньому, підходять лише методи, засновані на вейвлет-перетворенні [16, 27] і методи часткового відтворення сигналу за його неповною модовою декомпозицією [23], наприклад, метод Гільберта-Хуанга [26]. Їх недоліками є високі складність і трудомісткість.

**Особливості параметричних та нелінійних моделей опору плазмоерозійних навантажень.** Побудована за даними рис. 2 як результат поділу миттєвих значень напруги на відповідні миттєві значення струму в кожний момент часу  $t_j$  параметрична залежність усередненого еквівалентного опору  $R(t_j) = \bar{u}(t_j) / \bar{i}(t_j)$  плазмоерозійного навантаження представлена на рис. 3. Як видно з порівняння параметричних залежностей струму (рис. 2) і опору (рис. 3) плазмоерозійного навантаження,

На рис. 2 представлено осцилограми напруги і струму, усереднені за вибіркою з 20 пар, зняті в однакових умовах з осцилограми рис. 1 і згладжені методом простого ковзного середнього [4]. З порівняння рис. 1 і рис. 2 видно, що усереднення навіть за вибіркою малої потужності та згладжування простим методом достатньо для зменшення на порядки розмаху стохастичних високочастотних флуктуацій сигналів, викликаних утворенням, розвитком, міграцією і зникненням поодиноких каналів електропровідності в шарі гранул, а також зменшення в рази менш високочастотних розмахів сигналів, спричинених динамікою груп каналів електропровідності.

Зауважимо, що різні типи математичних моделей плазмоерозійного навантаження потребують різної глибини фільтрації вхідних сигналів. Найменшої глибини фільтрації потребують стохастичні, параметрично-стохастичні та нелінійно-стохастичні моделі, а найбільшої – нелінійні. Фільт-

моди на графіку рис. 3 виражені більше, ніж на рис. 2. Це доводить, що першопричиною їхнього виникнення є флуктуації опору, викликані описаними вище фізичними процесами. На графіку рис. 3 спостерігається тенденція збільшення опору плазмоерозійного навантаження на границях мод з плином часу, що спричинено, насамперед, ерозією приконттактних зон гранул.

Залежність на рис. 3 є графічним відображенням параметричної моделі опору плазмоерозійного навантаження. Для побудови його математичної параметричної моделі необхідно апроксимувати залежність рис. 3 аналітичними функціями. Для цього в [7] запропонована функція виду

$$R(t) = R_{0t} + R_1(t) + R_2(t) = R_{0t} + A_{1t} \exp[-a_{1t}t] + A_{2t} \exp[a_{2t}t], \quad (1)$$

де  $R_{0t}$  – постійна складова активного опору шару гранул;  $R_1(t) = A_{1t} \exp[-a_{1t}t]$  – параметрична складова активного опору шару гранул, що характеризує процеси генерації вільних носіїв заряду в плазмових каналах та описує поведінку опору шару гранул на передньому фронті імпульсу струму;  $R_2(t) = A_{2t} \exp[a_{2t}t]$  – параметрична складова активного опору шару гранул, що характеризує процеси рекомбінації вільних носіїв заряду в плазмових каналах та описує поведінку опору шару гранул на задньому фронті імпульсу струму;  $A_{1t}$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що характеризує величину спаду опору шару гранул на часовому інтервалі переднього фронту струму, Ом;  $a_{1t}$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що характеризує швидкість спаду опору шару гранул на часовому інтервалі переднього фронту струму, 1/с;  $A_{2t}$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що характеризує величину росту опору шару гранул на часовому інтервалі заднього фронту струму, Ом;  $a_{2t}$  – коефіцієнт апроксимуючої функції, що характеризує швидкість росту опору шару гранул на часовому інтервалі заднього фронту струму, 1/с.

$R, \text{ Ом}$

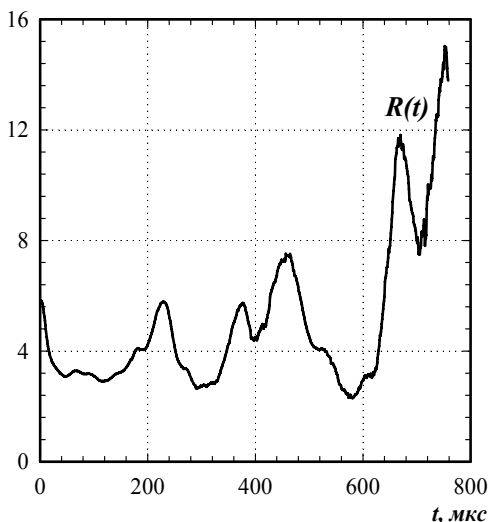


Рис. 3

Вибір експоненціальних функцій обумовлений тим, що процеси іонізації, рекомбінації, розвитку лавин і проростання стримерів можуть бути описані такими функціями [15]. З урахуванням інерційності рекомбінації вільних носіїв заряду в плазмових каналах третій доданок (1) можна записати у вигляді  $R_2(t) = A_t \cdot \exp[a_{2t}(t - t_0)]$ . При цьому параметр  $t_0$  враховує часовий зсув початку процесів рекомбінації відносно початку імпульсу. Однак, якщо позначити  $A_{2t} = A_t / \exp[a_{2t}t_0]$ , то даний вираз буде ідентичний третьому доданку (1).

Зауважимо, що формула (1) справедлива лише для першої моди параметричної залежності рис. 3. Для побудови багатомодальних параметричних залежностей потрібно використовувати більш складні математичні моделі, що призводить до значного зростання складності диференціальних рівнянь, які описують перехідні процеси в таких системах, роблячи їх вирішення аналітичними методами практично неможливим.

Оскільки питомий енергетичний вклад інших мод струму плазмоерозійного навантаження несуттєвий, на сьогодні в літературі не зустрічаються багатомодальні аналітичні параметричні моделі їхнього опору. Використання параметричних моделей опору призводить до лінійних диференціальних рівнянь із змінними коефіцієнтами при описанні перехідних процесів у таких системах, тобто коефіцієнти рівнянь залежать лише від незалежної змінної, за якою відбувається диференціювання.

Побудовані за даними рис. 2 і рис. 3 нелінійні залежності усередненого еквівалентного опору плазмоерозійного навантаження від струму в ньому та від напруги на ньому представлені на рис. 4 і рис. 5 відповідно. Як видно з цих рисунків, багатомодальність параметричних залежностей струму і опору плазмоерозійного навантаження, які є основою для побудови нелінійних залежностей опору, призводить до неоднозначності останніх і появи у них ділянок з гістерезисом. Для таких залежностей принципово не можуть бути побудовані суто нелінійні моделі, хоча вони можуть бути описані нелінійно-параметричними моделями, які значно складніші. Вхідними даними для побудови суто нелінійних моделей опору, який залежить як від струму, так і від напруги, можуть бути лише одномодальні параметричні залежності зазначених величин.

Крім того, оскільки значення опору навіть в одномодальних параметричних залежностях при одних і тих самих значеннях струму або напруги на передньому та задньому фронтах їхніх мод різні,

це призводить до неоднозначності його нелінійних моделей. Ця проблема може бути вирішена наступними способами: 1) розгляд окремо значень опору на передньому та задньому фронтах струму або напруги; 2) усереднення опору по значеннях на передньому та задньому фронтах струму або напруги; 3) врахування значень опору лише на одному із фронтів струму або напруги [20]. Це призводить до побудови двох нелінійних моделей опору в першому випадку, що є найпростішим перехідним етапом від нелінійної до нелінійно-параметричної моделі, або до незначного збільшення похибки апроксимації нелінійних залежностей на окремих її ділянках у другому та третьому випадках у порівнянні з першим.

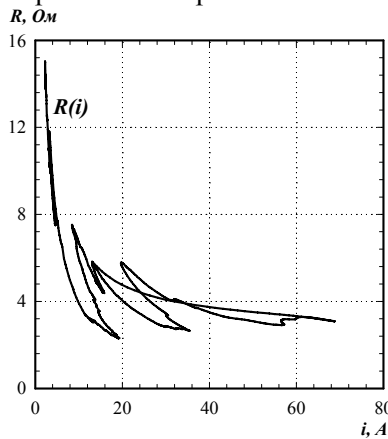


Рис. 4

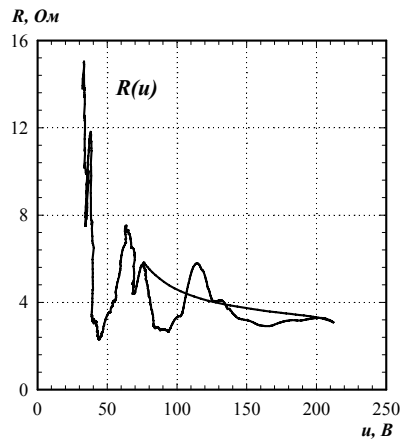


Рис. 5

Для підвищення адекватності нелінійних моделей при зміні початкових умов на реактивних елементах розрядного контура (на розрядному конденсаторі та дроселі) [8, 6] у широких межах у [20] запропоновано коригувати значення коефіцієнтів нелінійних моделей навантаження у відповідності до цієї зміни. Такі нововведення дозволили знизити похибки апроксимації нелінійних залежностей опору плазмоерозійних навантажень з 150 до 17% при окремих значеннях амплітуди імпульсів прикладеної напруги, а в серед-

ньому у всьому діапазоні її зміни – з 56 до 8% [20], що істотно підвищило адекватність нелінійних моделей.

Безперечною перевагою нелінійних моделей є незалежність їхніх коефіцієнтів від параметрів реактивних елементів (ємності та індуктивності) розрядного контура, що значно зменшує трудомісткість моделювання при їхній зміні в широких межах. На відміну від нелінійних моделей, параметричні моделі потребують корекції коефіцієнтів при кожній зміні параметрів реактивних елементів розрядного контура. Перевагами параметричних моделей є більша адекватність (похибка апроксимації становить менше 4% за даними [7]) та здатність описувати несиметричні та багатомодальні залежності.

Зважаючи на особливості параметричних та нелінійних моделей опору плазмоерозійного навантаження, найбільш перспективними випадками використання параметричних моделей є перехідні процеси в розрядно-імпульсних системах з таким навантаженням за умов великих значень та незначної зміни сталої часу або періоду власних коливань вихідного контура генератора імпульсів з таким навантаженням та невисоких значень початкової енергії на його реактивних елементах. Як правило, струм навантаження за таких умов містить багато мод, що значно утруднює застосування нелінійних моделей його опору. Застосування нелінійних моделей плазмоерозійного опору більш перспективне у випадках, коли потрібно змінювати ємність конденсатора та індуктивність дроселя розрядного контура в широких межах, а початкової напруги на конденсаторі достатньо для формування одномодальних імпульсів розрядного струму [20].

**Висновки.** 1. Різноманіття умов та механізмів виникнення, еволюції, міграції по поверхні гранул та зникнення плазмових каналів зумовлює високочастотну стохастичну модуляцію розрядного струму в плазмоерозійних навантаженнях та виникнення в ньому декількох мод. Крім того, нелінійно-параметрична залежність опору таких навантажень спричиняє зміну загальної тривалості та форми розрядного струму навіть при незначних змінах початкових умов у колі з ними. Все це у сукупності призводить до того, що напруга на зазначених навантаженнях та струм у них у загальному випадку є неперіодичними нестационарними і недермінованими.

2. Для зменшення похибки апроксимації експериментальних залежностей еквівалентного опору плазмоерозійних навантажень аналітичними функціями доцільно використовувати фільтрацію синхронних осцилограм напруги і струму в них. В залежності від виду математичної моделі опору плазмоерозійних навантажень глибина фільтрації осцилограм напруги і струму в них має бути різною. Найменша глибина фільтрації застосовується при побудові стохастичних моделей, середня – параметричних і найбільша – нелінійних.

3. Багатомодальні перехідні процеси в плазмоерозійних навантаженнях можуть бути адекватно описані лише параметричними, параметрично-нелінійними та параметрично-стохастичними моделями. Як правило, похибка апроксимації параметричних залежностей опору таких навантажень у 2–3 рази менша, ніж нелінійних. Застосування параметричних моделей таких навантажень більш доцільно за умов великих значень та незначної зміни сталої часу перехідного процесу або періоду власних коливань кіл з ними. Це дозволяє не тільки зменшити похибку моделювання, а й описувати процеси, які принципово не можуть бути враховані в нелінійних моделях.

1. *Безкровный Ю.А., Левченко В.Ф., Левченко Ю.В.* Электроимпульсная очистка промышленных сточных вод // Вода і водоочисні технології. – 2004. – № 3. – С. 71–74.
2. *Воробьев Г.А., Мухачев В.А.* Пробой тонких диэлектрических пленок. – М.: Сов. радио, 1977. – 72 с.
3. *Гороновский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
4. *Грешилов А.А., Стакун В.А., Стакун А.А.* Математические методы построения прогнозов. – М.: Радио и связь, 1997. – 112 с.
5. *Давыдов В.А.* Очистка геофизических данных от шумов с использованием преобразования Гильберта-Хуанга. [Электронный ресурс] / Давыдов В.А., Давыдов А.В. // Актуальные инновационные исследования: наука и практика. – 2010. – № 1. – с. 1. – Режим доступа : [http://www.actualresearch.ru/nn/2010\\_1/Article/geo/davydov.htm](http://www.actualresearch.ru/nn/2010_1/Article/geo/davydov.htm).
6. *Захарченко С.Н.* Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 17–27.
7. *Захарченко С.Н., Шидловская Н.А.* Моделирование сопротивления гранулированных токопроводящих сред параметрическими зависимостями // Электронное моделирование. – 2012. – 34, № 5. – С. 91–102.
8. *Захарченко С.Н.* Особенности электромагнитных процессов в установках искроэрозийной коагуляции для систем водоподготовки тепловых сетей и агрегатов // Новини енергетики. – 2012. – № 6. – С. 41–48.
9. *Захарченко С.Н.* Повышение эффективности получения ультрадисперсных частиц металлов объемным электроэрозийным диспергированием их гранул в жидкости // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 16–23.
10. *Захарченко С.М.* Статистичні дослідження еквівалентного електричного опору гетерогенного струмопровідного середовища при його електроерозійній обробці на прикладі гранул алюмінію у воді // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. – № 1 (133). – С. 62–67.
11. *Захарченко С.Н.* Физическая модель гранулированной токопроводящей среды // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 6. – С. 19–26.
12. *Лопатько К.Г., Мельничук М.Д.* Фізика, синтез та біологічна функціональність нанорозмірних об'єктів. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2013. – 297 с.
13. *Намитоков К.К.* Электроэрозионные явления. – М.: Энергия, 1978. – 456 с.
14. *Подольцев А.Д., Супруновская Н.И.* Моделирование и анализ электроразрядных процессов в нелинейной RLC цепи // Техн. електродинаміка. Темат. выпуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2006. – Ч. 4. – С. 3–8.
15. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
16. *Тропченко А.Ю., Тропченко А.А.* Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 100 с.
17. *Ушаков В.Я.* Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во Томского университета, 1975. – 256 с.
18. *Стромберг А.Г., Семченко Д.П.* Физическая химия. – М.: Высшая школа, 2009. – 528 с.
19. *Хуанг Т.С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г.Дж., Зохар Ш., Юстуссон Б.И., Тянь Ш.-Г.* Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
20. *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.
21. *Щерба А.А., Захарченко С.М., Спінул Л.Ю.* Закономірності змінення електричного опору шару алюмінієвих гранул при їх електроіскровому диспергуванні // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – 2010. – Вип. 25. – С. 133 – 139.
22. *Berkowitz A.E., Walter J.L.* Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine Powders // Journal of Materials Research. – 1987. – No 2. – Pp. 277–288.
23. *Boudraa A.O., Cexus J.C.* EMD-Based Signal Filtering // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2007. – Vol. 56. – No 6. – Pp. 2196–2202.
24. *Chen S.W., Lu X., Blackburn E., Lauter V., Ambaye H., Chan K.T., Fullerton E.E., Berkowitz A.E., Sinha S.K.* Nonswitchable Magnetic Moments in Polycrystalline and (111)-epitaxial Permalloy / CoO exchange-biased bilayers // Physical Review. – 2014. – В 89. – Pp. 094419-1 – 094419-7.
25. *Danilenko N.B., Savel'ev G.G., Yavorovskii N.A., Yurmazova T.A.* Chemical Reactions in Electric Pulse Dispersion of Iron in Aqueous Solutions // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2008. – Vol. 81. – No 5. – Pp. 803–809.

26. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-Ch., Tung C.C., Liu H.H. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis // Proc. R. Soc. London A, Math. Phys. Sci. – 1998. – Vol. 454. – Issue 1971. – Pp. 903–995.

27. Meyer Y. Wavelets and Operators. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992. – 223 p.

28. Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E. Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  Nanoparticles With Enhanced Thermoelectric Performance // Nanotechnology. – 2012. – Vol. 23. – Pp. 415604-1 – 415604-7.

29. Perekos A.E., Chernenko V.A., Bunyaev 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 // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 112. – Pp. 093909-1 – 093909-7.

30. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheryava I.N. Spark Erosion of Conducting Granules in a Liquid: Analysis of Electromagnetic, Thermal and Hydrodynamic Processes // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 6. – С. 4–16.

УДК 621.3.011.72: 621.3.014.14

### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЭРОЗИОННЫХ НАГРУЗОК

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

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

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

*Рассмотрены особенности влияния физических процессов, имеющих место при протекании импульсных электрических токов в многоканальных плазмоэрозионных нагрузках, на форму токов и на вид параметрической и нелинейной зависимостей эквивалентного сопротивления таких нагрузок. Приведен сравнительный анализ адекватности и областей применения параметрических и нелинейных моделей эквивалентного электрического сопротивления плазмоэрозионных нагрузок. Показано, что учет многомодальности импульсных токов возможен только при использовании параметрических и стохастически-параметрических моделей сопротивления плазмоэрозионных нагрузок. Показано, что применение параметрических моделей таких нагрузок более целесообразно при условии больших значений постоянной времени переходного процесса или периода собственных колебаний цепей с ними и их незначительных изменений.* Библ. 30, рис. 5.

**Ключевые слова:** плазмоэрозионная нагрузка, разрядный ток, параметрическая модель, нелинейная модель, адекватность.

### PHYSICAL PREREQUISITES OF CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS OF ELECTRIC RESISTANCE OF PLASMA-EROSIVE LOADS

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

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

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

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

*In the present article are described the features of the influence of the physical processes taking place during the flow of pulsed electric currents in multichannel plasma-erosive loads on the current form and the form of parametric and non-linear dependency of the equivalent resistance of such loads. A comparative analysis of the relevance and range of applicability of parametric and non-linear models of equivalent electric resistance plasma-erosive loads is given. It is shown that consideration of multimodal pulse currents is only possible with the use of parametric and stochastic-parametric models of plasma-erosive load resistance. It is shown that the use of parametric models of such loads is more appropriate at higher values of time constant of the transient or the period of free oscillation of circuits with them and their minimal modifications.* References 30, figures 5.

**Key words:** plasma-erosive load, discharge current, parametric model, non-linear model, the adequacy.

1. Bezkrivnyiy Yu.A., Levchenko V.F., Levchenko Yu.V. Electric Pulse Purification of Industrial Sewage // Voda i Vodoochysni Tekhnolohii. – 2004. – No 3. – Pp. 71–74. (Rus)

2. Vorobyev G.A., Muhachev V.A. Breakdown of thin Dielectric Films. – Moskva: Sovetskoe Radio, 1977. – 72 p. (Rus)

3. Goronovskiy I.S. Radiotechnical Circuits and Signals. – Moskva: Radio i Sviaz, 1986. – 512 p. (Rus)

4. Greshilov A.A., Stakun V.A., Stakun A.A. Mathematical methods of making predictions. – Moskva: Radio i Sviaz, 1997. – 112 p. (Rus)

5. Davydov V.A., Davydov A.V. Noise Removal from Geophysical Data With the Use of the Hilbert-Huang Transform. [Elektronniy resurs] // Aktualnye innovatsionnye issledovaniia: nauka i praktika. – 2010. – No 1. – P. 1. Rezhym dostupu do zhurn.: [http://www.actualresearch.ru/nn/2010\\_1/Article/geo/davydov.htm](http://www.actualresearch.ru/nn/2010_1/Article/geo/davydov.htm). (Rus)

6. *Zakharchenko S.N.* Modeling of Dependence of Electrical Resistance of Granulated Conductive Mediums from a Pulse Current Proceeding in Them // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2012. – No 5. – Pp. 17–27. (Rus)
7. *Zakharchenko S.N., Shidlovskaia N.A.* Modeling of Resistance of Granulated Conductive Media by Parametrical Dependences // *Elektronnoe Modelirovanie*. – 2012. – 34, No 5. – Pp. 91–102. (Rus)
8. *Zakharchenko S.N.* Features of Electromagnetic Processes in Spark Erosion Coagulation Installations for Water Treatment Systems, Heating Systems and Units // *Novyny Enerhetyky*. – 2012. – No 6. – Pp. 41–48. (Rus)
9. *Zakharchenko S.N.* Improving the Efficiency of Obtaining of the Ultradispersive Metal Particles by Volume Electric-erosive Dispersion their Granules in a Liquid // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2013. – No 1. – Pp. 16–23. (Rus)
10. *Zakharchenko S.M.* Statistical Rresearch of Equivalent Electric Resistance of the Heterogeneous Current-carrying Medium at its Electric-erosive Processing on an Example of Granules of Aluminum in Water // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. – 2013. – No 1 (133). – Pp. 62–67. (Ukr)
11. *Zakharchenko S.N.* Physical Model of the Granulated Conductive Medium // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2012. – No 6. – Pp. 19–26. (Rus)
12. *Lopatko K.G., Melnichuk M.D.* Physics, Synthesis and Biological Functionality of Nanosize objects. Kyiv: Vydavnychiy tsentr Natsionalnoho Universytetu Bioresursiv i Pryrodokorystuvannia Ukrainy. – 2013. – 297 p. (Ukr)
13. *Namitkov K.K.* Electrical-erosive Phenomenon. – Moskva: Energiia, 1978. – 456 p. (Rus)
14. *Podoltsev A.D., Suprunovskaya N.I.* Modeling and the Analysis of Electric Discharge Processes in Nonlinear RLC-circuits // *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki"*. – 2006. – Vol. 4. – Pp. 3–8. (Rus)
15. *Riser Yu.P.* Physics of the Discharge in Gas: The manual. – Moskva: Nauka, 1987. – 592 p. (Rus)
16. *Tropchenko A.Yu., Tropchenko A.A.* Digital Signal Processing. Preprocessing Methods. – Sankt Peterburg: SPbGU ITMO, 2009. – 100 p. (Rus)
17. *Ushakov V.Ja.* Pulse Electric Breakdown of Liquids. – Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo universiteta, 1975. – 256 p. (Rus)
18. *Stromberg A.G., Semchenko D.P.* Physical Chemistry: The Manual. – Moskva: Vysshaya Shkola, 2009. – 528 p. (Rus)
19. *Huang T.S., Eklund Dzh.-O., Nussbaumer G.Dzh., Zokhar Sh., Iustusson B.I., Tian Sh.-G.* Fast Algorithms in Digital Image Processing. Transforms and Median Filters. – Moskva: Radio i Sviaz, 1984. – 224 p. (Rus)
20. *Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkassky A.P.* Nonlianer-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)
21. *Shcherba A.A., Zakharchenko S.M., Spinul L.Yu.* Patterns of Change of the Electrical Resistance of Layer of Aluminum Granules During their Electric Erosive Dispersion // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. – 2010. – Iss. 25. – Pp. 133–139. (Ukr)
22. *Berkowitz A.E., Walter J.L.* Spark Erosion: A Method for Producing Rapidly Quenched Fine Powders // *Journal of Materials Research*. – 1987. – No 2. – Pp. 277–288.
23. *Boudraa A.O., Cexus J.C.* EMD-Based Signal Filtering // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2007. – Vol. 56. – No 6. – Pp. 2196–2202. (Eng)
24. *Chen S.W., Lu X., Blackburn E., Lauter V., Ambaye H., Chan K.T., Fullerton E.E., Berkowitz A.E., Sinha S.K.* Nonswitchable Magnetic Moments in Polycrystalline and (111)-Epitaxial Permalloy / CoO Exchange-Biased Bilayers // *Physical Review*. – 2014. – B 89. – Pp. 094419-1 – 094419-7.
25. *Danilenko N.B., Savel'ev G.G., Yavorovskii N.A., Yurmazova T.A.* Chemical Reactions in Electric Pulse Dispersion of Iron in Aqueous Solutions // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2008. – Vol. 81. – No 5. – Pp. 803–809.
26. *Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-Ch., Tung C.C., Liu H.H.* The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis // *Proc. R. Soc. London A, Math. Phys. Sci.* – 1998. – Vol. 454. – Issue 1971. – Pp. 903–995.
27. *Meyer Y.* Wavelets and operators. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992. – 223 p.
28. *Nguyen P.K., Lee K.H., Kim S.I., Ahn K.A., Chen L.H., Lee S.M., Chen R.K., Jin S., Berkowitz A.E.* Spark Erosion: a High Production Rate Method for Producing  $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$  Nanoparticles with Enhanced Thermoelectric Performance // *Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 23. – Pp. 415604-1 – 415604-7.
29. *Perekos A.E., Chernenko V.A., Bunyaev 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 // *J. Appl. Phys.* – 2012. – Vol. 112. – Pp. 093909-1 – 093909-7.
30. *Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheryava I.N.* Spark Erosion of Conducting Granules in a Liquid: Analysis of Electromagnetic, Thermal and Hydrodynamic Processes // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2004. – No 6. – Pp. 4–16.

Надійшла 12.01.2017  
Остаточний варіант 01.02.2017