

**РОЗВИТОК НАПІВПРОВІДНИКОВИХ РОЗРЯДНО-ІМПУЛЬСНИХ СИСТЕМ
ОБРОБКИ ГРАНУЛЬОВАНИХ СТРУМОПРОВІДНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Н.А. Шидловська*, чл.-кор. НАН України, **С.М. Захарченко****, докт.техн.наук,
Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.
E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net

Наведено аналіз еволюції напівпровідникових розрядно-імпульсних систем обробки гранульованих струмопровідних середовищ. Описано основні типи тиристорних генераторів розрядних імпульсів, особливості їх роботи, переваги та недоліки. Проаналізовано методи підвищення стабільності параметрів та зменшення тривалості розрядних імпульсів тиристорних генераторів. Показано шляхи підвищення питомої частки нанодисперсних та субмікронних ерозійних частинок, які отримані за допомогою тиристорних розрядно-імпульсних систем. Описано розвиток транзисторних генераторів розрядних імпульсів та наведено їх переваги і недоліки. Наведено алгоритми керування транзисторними генераторами імпульсів, які дозволяють зменшити їх нестабільність, та дана схема такого генератора. Показано шляхи підвищення техніко-економічних показників транзисторних генераторів імпульсів. Бібл. 36, рис. 2.

Ключові слова: розрядно-імпульсні системи, тиристорні генератори, транзисторні генератори, іскро- та плазмоерозійна обробка, гранульовані струмопровідні середовища

Вступ. Напівпровідникові розрядно-імпульсні системи іскро- та плазмоерозійної обробки гранульованих струмопровідних середовищ є апаратною основою реалізації наступних трьох груп електротехнологічних процесів: виробництва мікродисперсних порошків металів і сплавів, в тому числі багатокомпонентних, надтвердих, тугоплавких, магнітних та ін. [1–10], знезараження та очищення природних та стічних вод від мікроорганізмів, дисперсних домішок та іонів важких металів [10–12], а також отримання гідрозолів біологічно активних металів задля застосування у рослинництві і тваринництві [13–15]. Удосконалення відомих електроімпульсних технологічних процесів та розроблення нових потребують розвитку розрядно-імпульсних систем, які їх реалізують на практиці, у напрямку розширення діапазонів регулювання і підвищення стабільності параметрів розрядних імпульсів, а також підвищення їх ефективності.

Метою роботи є аналіз еволюції напівпровідникових розрядно-імпульсних систем обробки гранульованих струмопровідних середовищ та розроблення систем задля підвищення ефективності технологічних процесів очищення природних та стічних вод, а також отримання седиментаційно стійких гідрозолів біологічно активних металів.

Аналіз еволюції напівпровідникових розрядно-імпульсних систем обробки гранульованих струмопровідних середовищ. Тиристорні розрядно-імпульсні системи прийшли на зміну релаксаційним RC - і LC -генераторам розрядних імпульсів та системам з газорозрядними комутаторами на початку 80-х років ХХ сторіччя [1, 16–20]. Порівняно з попередніми вони більш надійні, мають більший термін експлуатації, коефіцієнт корисної дії та дають змогу підвищити точність регулювання параметрів розрядних імпульсів, їх стабільність, частоту повторення і потужність. Ці якості дозволили реалізувати на їх базі промислове обладнання щодо описаних вище технологічних процесів [1, 16–18].

Одним із перших, найпростіших і надійних тиристорних генераторів розрядних імпульсів є генератор, який складається з керованого випрямляча напруги мережі живлення, зарядного тиристора із обмежуючим швидкість наростання струму дроселем, конденсатора і розрядного тиристора. Особливості роботи такого генератора описано у багатьох публікаціях, зокрема [13, 21], тому тут зазначимо лише його основні недоліки, які разом із новими вимогами технологічних процесів спричинили подальший розвиток таких систем. Хоча генератори такого типу дають змогу точно регулювати частоту повторення розрядних імпульсів і регулювати напругу на виході керованого випрямляча з похибкою менше 5%, вони не дають можливість регулювати параметри розрядних

імпульсів під час розряду робочого конденсатора і за час менший постійної часу перехідних процесів фільтру керованого випрямляча.

В таких генераторах точність регулювання струму і тривалості імпульсів дуже низька, оскільки ці параметри залежать не тільки від ємності конденсатора, початкових умов на ньому, а також і від еквівалентного електричного опору гранульованого струмопровідного середовища, який стохастично змінюється в широких межах як під час одного розрядного імпульсу, так і від імпульсу до імпульсу [22, 23] і залежить від струму, що протікає в ньому [24, 25], від часу його протікання [26] та від частоти розрядних імпульсів [27]. Крім того, тиристорні генератори, виконані за такою схемою, не дозволяють на практиці реалізувати частоту повторення розрядних імпульсів вище 1 кГц та забезпечити середнє значення потужності у навантаженні вище одиниць кіловат. Такі системи широко використовуються у пошуку оптимальних параметрів технологічних режимів отримання дослідних партій порошків металів і сплавів, а також очищення і знезараження водних потоків [13, 21].

Вирішити проблему підвищення частоти регулювання початкових умов на робочому конденсаторі до частоти повторення розрядних імпульсів дозволило застосування керованих перезарядних тиристорно-індуктивних ланок, що реалізували від'ємний та додатний зворотні зв'язки за напругою [17, 19]. Але за таким схемотехнічним рішенням точність регулювання глибини цих зв'язків на практиці була малою, що не забезпечувало високу точність регулювання початкових умов на робочому конденсаторі. Використання перезарядного кола додатнього зворотного зв'язку за напругою дозволило також примусово обмежити тривалість розрядних імпульсів до приблизно 40 мкс без істотного зменшення їх динамічних параметрів на передньому фронті, що актуально не тільки для технологічних процесів, в яких необхідні такі параметри імпульсів, але і для підвищення стабільності роботи генератора в умовах високих частот повторення розрядних імпульсів і значного стохастичного зростання еквівалентного опору навантаження.

Скорочення тривалості розрядних імпульсів тиристорних генераторів шляхом зменшення ємності робочого конденсатора до 20 мкФ і менше не тільки не дає досягти значень менше 15 мкс, але на порядок знижує продуктивність технологічних процесів та істотно зменшує ефективність процесів перетворення енергії у таких системах [28]. Іншим методом зменшення тривалості розрядних імпульсів без істотного зменшення їх динамічних параметрів на передньому фронті є застосування тиристора, який шунтує навантаження через деякий час після початку розрядного імпульсу [13, 29, 30]. Це скорочує тривалість імпульсів до приблизно 20 мкс (в залежності від часу і тривалості вмикання шунтуючого тиристора і постійної часу перехідних процесів або частоти вільних коливань у вихідних колах), забезпечує не менше зниження продуктивності технологічних процесів, ніж у попередньому методі, але суттєво зменшує коефіцієнт корисної дії системи. Через значні втрати енергії у таких системах їх потужність, як правило, не перевищує 2 кВт, а сфера застосування обмежується дослідженням ефективності технологічних процесів у лабораторних умовах.

Задля забезпечення потужності у навантаженні 10 кВт і вище у складі генераторів використовуються багатоканальні формувачі розрядних імпульсів [18, 20]. У розрядно-імпульсних системах з такими генераторами можуть використовуватися розрядні камери з числом електродів від трьох і більше, а також декілька розрядних камер або через розв'язуючі діоди канали генератора можуть бути підключені до однієї електродної системи. Такі системи за живленням від трьохфазної мережі дають змогу реалізувати сумарну потужність у навантаженнях 100 кВт і вище та використовуються у виробництві гідроксиду алюмінію задля отримання з нього каталізатора на основі оксиду алюмінію з високорозвиненою поверхнею для застосування у хімічній промисловості, а також отримання високоактивного коагулянту для очищення водних потоків [18].

Наприкінці минулого сторіччя в ІЕД НАН України було розроблено схеми двоканальних тиристорних генераторів розрядних імпульсів з амплітудою напруги до 1 кВ, струму до 2 кА, частотою повторення до 2 кГц і потужністю до 500 кВт, які підключалися до двоелектродної розрядної камери. Проте замовники не змогли створити розрядні камери, які були здатні поглинати таку потужність у безперервному режимі роботи. Тому потужність тиристорних генераторів обмежили до 100 кВт. Задля послаблення негативного впливу стохастичного зменшення еквівалентного електричного опору шару гранул на стабільність параметрів розрядних імпульсів і, як наслідок, на збільшення дисперсії розподілу іскроерозійних частинок за розмірами, в розрядних камерах використовувалися імпульсні збурення потоку робочої рідини та його періодична продувка газом. Генератори такої потужності поставлялися для промислових установок науково-виробничого об'єднання (НВО) «Азот» (м. Новомосковськ, Росія), НВО «Ротор» (м. Черкаси, Україна) та Кара-

Балтинського гірсько-рудного комбінату (Киргизія). Згодом конструкторську технічну документацію таких генераторів ІЕД НАН України передав НВО «Ротор» для їх серійного виробництва.

Отже, класичні тиристорні розрядно-імпульсні системи з усіх відомих на сьогоднішній день систем забезпечують найбільшу потужність у навантаженні, вони найменш вразливі до короткочасних зростань розрядного струму до 10 разів внаслідок стохастичного зменшення опору навантаження, але не дозволяють ефективно генерувати імпульси тривалістю менше 20 мкс, що є однією з необхідних умов отримання нанодисперсної фази седиментаційно стійких гідрозолів біологічно активних металів для застосування у рослинництві і тваринництві [13–15].

Розрядно-імпульсні системи отримання нанодисперсних плазмоерозійних частинок металів. Одним із можливих шляхів використання тиристорних розрядно-імпульсних систем задля отримання нанодисперсної фази металів і сплавів є залучення додаткової вібраційної активації шару гранул в розрядній камері під час дії на нього імпульсів електричної енергії [13, 28]. Це дає змогу, по-перше, здійснити глибоку високочастотну амплітудну модуляцію імпульсу розрядного струму з тривалістю його мод декілька мікросекунд за рахунок підвищення частоти міграції плазмових каналів по поверхні сусідніх гранул та переключення їх на інші пари гранул. По-друге, знизити напругу електричного пробоя окисних плівок на поверхні металевих гранул за рахунок їх механічного руйнування внаслідок взаємного переміщення гранул у їх шарі під дією вібраційної активації, і, як наслідок, можливості зниження амплітуди імпульсів розрядної напруги. По-третє, підвищити еквівалентний опір шару гранул за рахунок збільшення середньої відстані між сусідніми гранулами у їх шарі внаслідок їх коливальних рухів під дією вібраційного впливу. Це призводить до зменшення як амплітуди розрядних струмів, так і пікових значень їх мод. Всі ці фактори разом взяті призводять до зниження енергії та часу існування окремих плазмових каналів між сусідніми гранулами в десятки разів, обмеження їх еволюції передіскровою стадією стримера або лідера і, як наслідок, зменшення на порядки об'єму металу, який випаровується або виплавляється з ерозійних лунок гранул та є джерелом матеріалу для формування ерозійних частинок [28].

Ще однією особливістю додаткової вібраційної активації шару металевих гранул у проходженні крізь нього імпульсів розрядного струму є зменшення діапазону стохастичної зміни його еквівалентного електричного опору, що збільшує стабільність технологічних процесів за таких умов. Всі перераховані вище особливості дозволили спростити навіть найпростіший тиристорний формувач розрядних імпульсів [21], до складу якого крім робочого конденсатора входили тільки зарядний тиристор з дроселем і розрядний тиристор, до пристрою, який складався з робочого конденсатора і тільки одного розрядного тиристора з вузлом примусового запирання [31] (рис. 1).

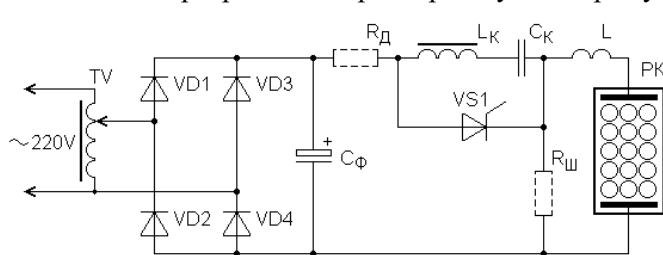


Рис. 1

Однією з основних вимог у процесі розробки генератора, спрощену схему силової частини якого наведено на рис. 1, була мінімальна вартість і кількість комплектуючих та максимальне використання наявних деталей. Такий генератор було розроблено і виготовлено для отримання дослідних партій гідрозолів біологічно активних металів в лабораторних умовах тільки в режимах з додатковою вібраційною активацією шару їх гранул

для Національного університету біоресурсів і природокористування України (НУБіПУ) [14].

Працює він наступним чином. Випрямлена за допомогою однофазного діодного моста ($VD1$ – $VD4$) напруга мережі живлення подається на конденсатор C_ϕ , який одночасно виконує дві функції – конденсатора фільтра і робочого конденсатора. Рівень напруги на ньому плавно регулюється за допомогою автотрансформатора TV . Відкриття тиристора $VS1$ дозволяє конденсатору C_ϕ розряджатися через кабель індуктивністю L (як правило до 2 мкГн) на розрядну камеру PK , в якій знаходиться шар металевих гранул. Примусове запирання тиристора $VS1$ [31] здійснюється за рахунок енергії, накопиченої від випрямляча в комутуючому конденсаторі C_K в момент часу безпосередньо перед відпиранням $VS1$. Комутуючий дросель L_K забезпечує коливальний розряд C_K через $VS1$ із запиранням його у момент часу, коли направлений назустріч основному струму від випрямляча струм комутуючого контура за модулем досягає значення меншого значення струму випрямляча на величину струму утримання тиристора [31]. Таким чином, час відкритого стану тиристора $VS1$

визначається періодом власних коливань контуру L_K-C_K-VSI і на практиці становить десятки мікросекунд.

Така схема примусової комутації розрахована на елементи зі сталими параметрами [31]. Але еквівалентний опір шару металевих гранул не тільки істотно залежить від струму, що в ньому протікає [24, 25], чи прикладеної напруги, але і стохастично змінюється в широких межах як в рамках одного імпульсу, так і від імпульсу до імпульсу [22, 23]. В цих умовах стабільність роботи пристрою невисока. Ситуацію рятує лише залучення зовнішньої вібраційної активації шару гранул та використання додаткового резистора R_D , який обмежує значення струму короткого замикання і шунтуючого резистора R_{III} , який забезпечує шлях протікання струму заряду C_K у випадку, якщо еквівалентний опір шару гранул стає занадто великим внаслідок його стохастичної зміни. Застосування генератора рис. 1 разом із розрядною камерою та вібраційним столом дало змогу отримати у лабораторіях НУБіПУ дослідні партії седиментаційно стійких нанодисперсних гідрозолей біологічно активних металів *Ag, Cu, Zn, Fe, Mn, Co, Mo* та вивчити ефективність їх використання в рослинництві та тваринництві [14, 15].

Подальший розвиток напівпровідникових розрядно-імпульсних систем отримання нанодисперсних плазмоерозійних частинок металів у напрямку підвищення їх ефективності і стабільності роботи, а також скорочення тривалості розрядних імпульсів відбувався за рахунок заміни тиристорних ключів повністю керованими швидкодіючими біполярними транзисторами з ізольованим затвором (БТІЗ) та зворотнім захисним діодом. В таких пристроях вузол схеми рис. 1 $VSI-C_K-L_K-R_D-R_{III}$ був замінений на один або декілька БТІЗ і нульовий діод задля забезпечення протікання струму вихідного дроселя у разі запирання БТІЗ. Такі генератори створювали та використовували багато дослідників, фактично піднявши на новий рівень схемотехнічні рішення, відомі ще для генераторів розмірної іскроерозійної обробки металевих деталей, силовими ключами в яких були біполярні транзистори [32]. Використання генераторів за такою схемою дало можливість вперше отримати імпульси розрядного струму тривалістю менше 1 мкс і амплітудою понад 40 А і більше [33].

Оскільки переважна більшість силових БТІЗ дозволяє лише двократне короткочасне перевантаження за струмом, то для надійної роботи системи обмеження його амплітуди послідовно з транзистором та з кабелем індуктивністю L (рис. 1) включено додатковий дросель, який обмежує швидкість наростання розрядного струму. В залежності від конкретних умов роботи транзисторного генератора його індуктивність може складати від 4 до 20 мкГн, в той час як у тиристорних генераторах достатньо індуктивності вихідного кабелю, яка, зазвичай, лежить у межах від 0,5 до 2 мкГн і визначається його конструкцією. Розрядно-імпульсні системи з транзисторними генераторами дають змогу без застосування примусової вібраційної активації шару металевих гранул отримувати ерозійні частинки субмікронних розмірів [33], що дуже важливо, коли неможливо застосувати вібраційний стіл, наприклад, у роботі в криогенних рідинах або з важкими розрядними камерами. При цьому розміри кристалічного ядра частинок становили десятки нанометрів [33].

Стрімкий розвиток БТІЗ з початку 2000-х років призвів до того, що сучасний одиночний модуль таких відомих виробників як Mitsubishi, Infineon та ін. здатен комутувати імпульсні струми амплітудою до 7 кА за напруги до 1,7 кВ з частотами порядку 20 кГц за тривалості відключення менше 0,5 мкс та розсіювати з використанням найсучасніших систем охолодження до 17...20 кВт енергії. За умов, коли шпаруватість розрядних імпульсів не перевищує 10, але більше 2, що при частоті їх повторення 20 кГц відповідає їх тривалості від 5 до 25 мкс, з використанням лише одного такого модуля в розрядному контурі теоретично можливо створювати генератори потужністю порядку 500 кВт. Якщо за умовами технологічного процесу тривалість імпульсів повинна бути менше 5 мкс, максимальна потужність генератора буде меншою.

На наступному етапі розвитку транзисторних генераторів розрядних імпульсів основну увагу було приділено підвищенню стабільності їх основних параметрів, оскільки девіація навіть амплітуди імпульсів розрядних струмів і напруги призводить до збільшення дисперсії розподілу за розмірами ерозійних частинок [34], що знижує їх якість і призводить до додаткового зростання матеріало- і енергоємності процесу їх отримання. Основні принципи підвищення стабільності параметрів розрядних імпульсів полягали у наступному. По-перше, початкові умови на робочому конденсаторі перед кожним його розрядом регулювались з похибкою не більше 3% незалежно від попередніх умов на ньому. Для цього було спроектовано імпульсний транзисторний високочастотний (40 кГц) зарядний пристрій з двоконтурним регулюванням – внутрішній контур за миттєвим значенням зарядного струму, а зовнішній – за миттєвим значенням напруги на робочому конденсаторі [35]. Оскільки частота

зарядних імпульсів в десятки – сотні разів перевищувала частоту розрядних, відповідно їх заряд був значно меншим заряду розрядного імпульсу. Тому регулювання кількості зарядних імпульсів давало можливість з високою точністю стабілізувати напругу заряду робочого конденсатора.

Майже весь час силові транзистори зарядного пристрою працювали в ключовому режимі. Тому порівняно із зарядними пристроями, в яких транзистори працюють в лінійному режимі, це значно підвищило коефіцієнт корисної дії імпульсних пристроїв. Оскільки зовнішній контур регулювання напруги зарядного пристрою працював за релейним алгоритмом [35], тривалість відкритого стану транзисторів у останньому зарядному імпульсі, як правило, була меншою, ніж в решті імпульсів. Це сприяло підвищенню точності регулювання напруги на робочому конденсаторі, з метою подальшого підвищення якої внутрішній контур регулювання за зарядним струмом регулював рівень обмеження його амплітуди, виходячи із різниці поточного і заданого значень напруги на ньому, що детально описано в [36]. Також оператор мав змогу обмежити амплітуду зарядного струму значенням 5 А в режимі «точно» та значенням 17 А в режимі «грубо». В другому режимі швидкість заряду конденсатора була вищою.

По-друге, використання повністю керованих БТІЗ як розрядних ключів на відміну від неповністю керованих тиристорів дозволило з високою точністю регулювати тривалість розрядних імпульсів за стохастичної зміни еквівалентного електричного опору навантаження в широких межах. По-третє, нами вперше для таких систем було залучено другий канал регулювання розрядних імпульсів – за обмеженням їх амплітуди. Ці рішення при аперіодичному розряді робочого конденсатора дозволили зменшити похибки регулювання початкових умов на ньому до 3%, тривалості розрядних імпульсів до 2% і обмежити амплітуду розрядних імпульсів з дискретністю 10 А.

Ще одним аспектом підвищення якості плазмоерозійних седиментаційно стійких гідрозолів біологічно активних металів є зменшення в них питомої частки продуктів електролізного розчинення електродів та електролізу дисперсійного середовища. Задля його реалізації автори вперше для таких систем перейшли від використання уніполярних імпульсів до імпульсів, полярність яких чергується, що в ідеальному випадку постійного опору навантаження теоретично дає змогу усунути постійну складову розрядного струму, яка спричиняє електролізні явища. На практиці через стохастичний характер зміни опору навантаження від імпульсу до імпульсу повної компенсації постійної складової розрядного струму двох послідовних імпульсів не відбувається, але використання імпульсів, полярність яких чергується, дозволяє її знизити в сотні разів порівняно з уніполярними імпульсами. Для цього було спроектовано та виготовлено формувач розрядних імпульсів з використанням мостової схеми.

Спрощену функціональну схему силової частини генератора розрядних імпульсів, який реалізує описані вище функції, показано на рис. 2. Напруга мережі живлення випрямляється діодним мостом $VD1-V D4$ і відфільтровується від змінної складової конденсатором $C1$ ємністю 5400 мкФ, для безаварійного підключення якого використовується обмежуючий струм резистор $R1$, реле $K1$ з діодом $VD5$, яке замикається системою керування зарядного пристрою (СК ЗП) після досягнення напруги на $C1$ значення 250 В. Випрямленою напругою на $C1$ живиться високочастотний мостовий інвертор зарядного пристрою $VT1-V T4$ із зворотними діодами $VD6-V D9$. Для спрощення електромагнітних процесів у трансформаторі $TV1$ та в обмежуючому зарядний струм дроселі $L1$ частота комутації $VT1-V T4$ фіксована та становить 20 кГц. Двоконтурна СК ЗП керує інвертором за описаними вище алгоритмами та плавно регулює напругу заряду робочого конденсатора в діапазоні від 20 до 600 В. Резистор $R2$ є датчиком вхідного струму інвертора.

Діодна група $VD10-V D14$ являє собою високочастотний випрямляч, через який заряджається робочий конденсатор $C3$. Розрядний пристрій (РП) утворюють БТІЗ $VT5-V T8$, включені за мостовою схемою. Такий підхід формує розрядні імпульси як позитивної, так негативної полярності, а також полярності, яка чергується. Система керування розрядним пристроєм (СК РП) реалізує описані вище алгоритми як в циклі автоматичного повторення, так і в режимі очікування, забезпечує регулювання частоти розрядних імпульсів в діапазоні від 0,1 Гц до 10 кГц, їх тривалості від 0,5 до 500 мкс, амплітуди розрядного струму від 20 до 2047 А. Також вона запобігає виникненню аварійних режимів і сигналізує про недозволені комбінації параметрів.

Навіть у режимі коротких (до 5 мкс) імпульсів генератор дає змогу розвивати потужність у навантаженні більше 3 кВт протягом тривалого часу, що більш ніж достатньо для отримання дослідних партій порошків сплавів, гідрозолів біологічно активних металів і об'ємів очищеної води.

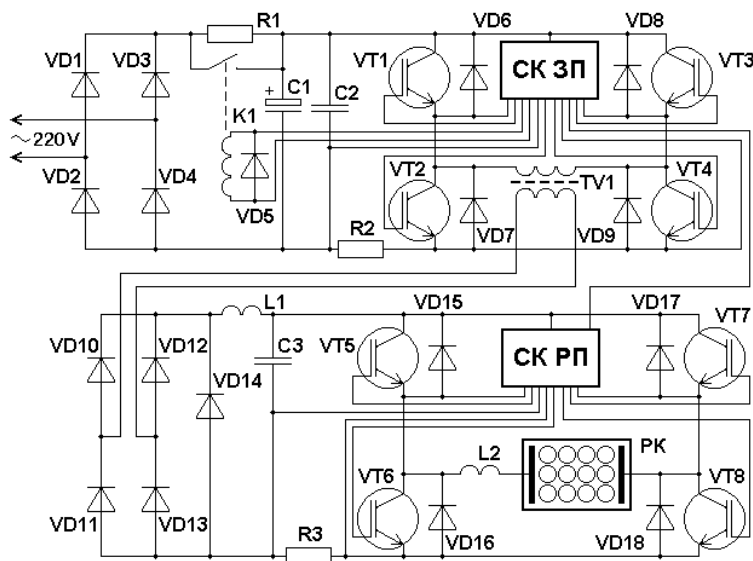


Рис. 2

В режимах з тривалістю імпульсів більше 15 мкс генератор розвивав потужність до 15 кВт. За потреби цей показник можна збільшити. Таким чином, з усіх розглянутих генератор на рис. 2 є найбільш функціональним, універсальним і найкращим чином підходить для лабораторних досліджень. Зворотною стороною цього є його велика складність і висока питома вартість на одиницю потужності.

Заключення. 1. На відміну від релаксаційних і газорозрядних генераторів тиристорні генератори дозволили вперше досягти потужностей до 50 кВт на чарунку. Це дало змогу реалізувати промислове виробництво гідроксиду і оксиду алюмінію, порошків дисперсно-зміцнених жаропрочних сплавів, а також очищення промислових стоків

від іонів важких металів та ін. Всі відомі заходи по зменшенню тривалості розрядних імпульсів тиристорних генераторів дозволили отримати найменшу тривалість розрядних імпульсів на рівні приблизно 20 мкс за умов достатньої продуктивності процесу. Проте цього виявилось недостатньо для отримання значної частки нанодисперсної фракції ерозійних частинок у виробництві седиментаційно стійких гідрозолів біологічно активних металів. Застосування примусової вібраційної активації шару гранул в процесі їх плазмоерозійного диспергування вирішує проблеми виробництва дослідних партій таких гідрозолів системами з тиристорними генераторами розрядних імпульсів.

2. Використання транзисторних генераторів розрядних імпульсів дозволило вперше скоротити їх тривалість до одиниць мікросекунд і менше без критичної втрати продуктивності процесу отримання субмікронних ерозійних частинок. Це дало змогу відмовитися від примусової вібраційної активації шару гранул в ряді технологічних процесів. Також застосування транзисторів як повністю керованих височастотних ключів дозволяє керувати початковими умовами на робочому конденсаторі незалежно від стохастичної зміни еквівалентного електричного опору навантаження в широких межах з похибкою менше 3%, а тривалістю розрядних імпульсів – з похибкою менше 2%.

3. Залучення транзисторів реалізує нові алгоритми керування параметрами розрядних імпульсів, проте коефіцієнт їх використання за струмом нижчий, ніж тиристорів. Це призводить до підвищення питомої на одиницю потужності вартості транзисторних генераторів. Одним із шляхів підвищення техніко-економічних показників транзисторних генераторів імпульсів може бути їх спеціалізація під конкретні технологічні процеси.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розроблення теорії та принципів побудови енергоефективних перетворювальних пристроїв стабілізації та регулювання параметрів електромагнітної енергії для систем живлення сучасних електротехнологічних комплексів» (шифр «Сигма-Ш4»). Державний реєстраційний номер 0117U000291.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов. Фрунзе: Илим, 1990. 256 с.

2. 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>.

3. 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. P. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>

4. Hong J.I., Parker F.T., Solomon V.C., Madras P., Smith D.J., Berkowitz A.E. Fabrication of spherical particles with mixed amorphous/crystalline nanostructured cores and insulating oxide shells. *J. Mater. Res.* 2008.

Vol. 23. Issue 06. P. 1758–1763. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0199>

5. Solomon V.C., McCartney M., Tang Y.J., Berkowitz A.E., O'Handley R.C., Smith D.J. Magnetic domain configurations in spark-eroded ferromagnetic shape memory *Ni-Mn-Ga* particles. *Appl. Phys. Lett.* 2005. Vol. 86. P. 192503-1 – 192503-3. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1925319>

6. Liu Y., Zhu K., Li X., Lin F., Li Y. Analysis of multi-scale *Ni* particles generated by ultrasonic aided electrical discharge erosion in pure water. *Advanced Powder Technology.* 2018. Vol. 29. Issue 4. Pp. 863–873. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.01.003>

7. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* 2003. Vol. 254–255. Pp. 1–6. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00932-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00932-0)

8. Dvornik M.I. Nanostructured WC–Co particles produced by carbonization of spark eroded powder: Synthesis and characterization. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials.* 2010. Vol. 28. Issue 4. Pp. 523–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2010.02.011>

9. Monastyrsky G.E., Yakovenko P.A., Kolomytsev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Portier R. Characterization of spark-eroded shape memory alloy powders obtained in cryogenic liquids. *Materials Science and Engineering: A.* 2008. Vol. 481–482. Pp. 643–646. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.213>

10. Danilenko N.B., Savelev G.G., Yavorovskii N.A., Khaskel'berg M.B., Yurmazova T.A., Shamanskii V.V. Water purification to remove As(V) by electropulse treatment of an active metallic charge. *Russian Journal of Applied Chemistry.* 2005. Vol. 78. No 10. Pp. 1631–1635.

11. 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.

12. 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>.

13. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Лопатык К.Г., Афтандиянц Е.Г. Применение объемного электроискрового диспергирования для получения седиментационно устойчивых гидрозолей биологически активных металлов. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України.* 2009. Вып. 22. С. 74–79.

14. Лопатык К.Г., Мельничук М.Д. Фізика, синтез та біологічна функціональність нанорозмірних об'єктів. К.: Видавничий центр НУБіП України, 2013. 297с.

15. Борисевич В.Б., Каплуненко В.Г., Косинов Н.В., Борисевич Б.В. Наноматериалы и нанотехнологии в ветеринарной практике. К.: ВД «Авіцена», 2012. 512 с.

16. Щерба А.А. Установка электроэрозионного диспергирования токопроводящих материалов. *Техническая электродинамика.* 1990. № 3. С. 88–92.

17. Щерба А.А. Тиристорные системы электропитания технологических установок с параметрической стабилизацией выходных характеристик. *Сборник научных трудов «Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии».* Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 1996. С.18–27.

18. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Shevchenko N.I., Suprunovskaya N.I. Thyristor Discharge Pulse Generator with Controllable Parameters for Thechnological System for Volumetric Electric Spark Dispersion of Metal Granules. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність».* 2005. Ч. 1. С. 57–60.

19. Щерба А.А. Принципы построения и стабилизации параметров полупроводниковых электроимпульсных систем электроискрового диспергирования слоя токопроводящих материалов. *Сборник научных трудов. «Стабилизация параметров электрической энергии».* Киев: Институт электродинамики АН Украины, 1991. С. 12 – 30.

20. Щерба А.А. Основные принципы построения многофазных стабилизированных источников питания установок электроэрозионного диспергирования металлов в жидкости. III-ая всесоюзная конференция «Проблемы преобразовательной техники». Киев, Украина. 1983. Ч. 5. С. 59–62.

21. Захарченко С.Н. Особенности электромагнитных процессов в установках искроэрозионной коагуляции для систем водоподготовки тепловых сетей и агрегатов. *Новини енергетики.* 2012. № 6. С. 41–48.

22. 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.

23. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Определение вероятностных свойств электрических характеристик цепей электроразрядных установок с учетом стохастически изменяющихся их параметров. *Технічна електродинаміка.* 2019. № 4. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2019.04.003>

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. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Моделирование нелинейного сопротивления

електроискровой нагрузки для синтеза цепи разряда конденсатора по временным характеристикам. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 3. С. 12–18.

26. 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>

27. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment. *Технічна електродинаміка*. 2006. № 2. С. 10–14.

28. Захарченко С.Н. Повышение эффективности получения ультрадисперсных частиц металлов объемным электроэрозионным диспергированием их гранул в жидкости. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 16–23.

29. Шидловский А.К., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электрических цепях разрядноимпульсных установок с емкостным накопителем энергии при ограничении длительности его разряда на электроискровую нагрузку и ненулевых начальных условиях. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 1. С. 42–48.

30. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient Analysis in Circuits of Electric Discharge Installations with Voltage Feedback taking into Account the Recovery Time of Locking Properties their Semiconductor Switches. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 3. С. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>

31. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Преобразовательная техника. К.: Вища школа, 1983. 431 с.

32. Лившиц А.Л., Отто М.Ш. Импульсная электротехника. М.: Энергоиздат, 1983. 352 с.

33. 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 электроэрозионных частиц. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. Т. 6. № 5 (60). С. 66–72.

34. Щерба А.А., Захарченко С.М., Супруновська Н.І., Шевченко Н.І., Монастирський Г.Є., Перетятко Ю.В., Петрученко О.В. Стабілізація режимів електротехнологічних систем для отримання іскроерозійних мікро- та нанопорошків. *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. 2006. Ч. 1. С. 120–123.

35. Захарченко С.Н., Руденко Ю.В. Сравнительный анализ алгоритмов импульсного заряда емкостных накопителей энергии для систем плазмоэрозионной обработки гетерогенных токопроводящих сред. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 37. С. 100–108.

36. Захарченко С.Н., Руденко Ю.В., Черкасский А.П. Повышение точности регулирования напряжения на емкостных накопителях энергии систем импульсной плазмоэрозионной обработки гетерогенных токопроводящих сред. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.030>

УДК 621.314: 621.373.54: 621.3.011.72: 621.3.014.14

РАЗВИТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СРЕД

Н.А. Шидловская, чл.-корр. НАН Украины, **С.Н. Захарченко**, докт.техн.наук,
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.
E-mail: shydlovska@ied.org.ua, snzakhar@ukr.net

Приведен анализ эволюции полупроводниковых разрядно-импульсных систем обработки гранулированных токопроводящих сред. Описаны основные типы тиристорных генераторов разрядных импульсов, особенности их работы, преимущества и недостатки. Проанализированы методы повышения стабильности параметров и уменьшения длительности разрядных импульсов тиристорных генераторов. Показаны пути повышения удельной доли нанодисперсных и субмикронных эрозионных частичек, полученных с помощью тиристорных разрядно-импульсных систем. Описано развитие транзисторных генераторов разрядных импульсов, приведены их преимущества и недостатки. Приведены алгоритмы управления транзисторными генераторами импульсов, которые позволяют уменьшить их нестабильность, и представлена схема такого генератора. Показаны пути повышения технико-экономических показателей транзисторных генераторов импульсов. Библ. 36, рис. 2.

Ключевые слова: разрядно-импульсные системы, тиристорные генераторы, транзисторные генераторы, искро- и плазмоэрозионная обработка, гранулированные токопроводящие среды

PROGRESS OF SEMICONDUCTOR DISCHARGE-PULSE SYSTEMS FOR PROCESSING GRANULAR CONDUCTIVE MEDIA

N.A. Shydlovska, S.M. Zakharchenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

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

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

An analysis of the evolution of semiconductor discharge-pulse systems for processing granular conductive media is given. The main types of thyristor generators of discharge pulses, the features of their operation, advantages and disadvantages are described. The methods of increasing the stability of parameters and reducing the duration of the discharge pulses of thyristor generators are analyzed. The ways of increasing the specific fraction of nanodispersed and submicron erosion particles obtained using thyristor discharge-pulse systems are shown. The development of transistor discharge pulse generators is described and their advantages and disadvantages are given. Algorithms for controlling transistor pulse generators, which make it possible to reduce their instability and a circuit of such generator are given. The ways of increasing the technical and economic indicators of transistor pulse generators are shown. References 36, figures 2.

Keywords: discharge-pulse systems, thyristor generators, transistor generators, spark and plasma erosion treatment, granular conductive media

1. 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)
2. 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>.
3. 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 Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ nanoparticles with enhanced thermoelectric performance. *Nanotechnology*. 2012. Vol. 23. P. 415604-1 – 415604-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/41/415604>
4. Hong J.I., Parker F.T., Solomon V.C., Madras P., Smith D.J., Berkowitz A.E. Fabrication of spherical particles with mixed amorphous/crystalline nanostructured cores and insulating oxide shells. *J. Mater. Res*. 2008. Vol. 23. Issue 06. P. 1758–1763. DOI: <https://doi.org/10.1557/JMR.2008.0199>
5. Solomon V.C., McCartney M., Tang Y.J., Berkowitz A.E., O'Handley R.C., Smith D.J. Magnetic domain configurations in spark-eroded ferromagnetic shape memory Ni-Mn-Ga particles. *Appl. Phys. Lett*. 2005. Vol. 86. P. 192503-1 – 192503-3. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1925319>
6. Liu Y., Zhu K., Li X., Lin F., Li Y. Analysis of multi-scale Ni particles generated by ultrasonic aided electrical discharge erosion in pure water. *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29. Issue 4. Pp. 863–873. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.01.003>
7. Berkowitz A.E., Hansen M.F., Parker F.T., Vecchio K.S., Spada F.E., Lavernia E.J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2003. Vol. 254–255. Pp. 1–6. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00932-0](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00932-0)
8. Dvornik M.I. Nanostructured WC–Co particles produced by carbonization of spark eroded powder: Synthesis and characterization. *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2010. Vol. 28. Issue 4. Pp. 523–528. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2010.02.011>
9. Monastyrsky G.E., Yakovenko P.A., Kolomytsev V.I., Koval Yu.N., Shcherba A.A., Portier R. Characterization of spark-eroded shape memory alloy powders obtained in cryogenic liquids. *Materials Science and Engineering: A*. 2008. Vol. 481–482. Pp. 643–646. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.12.213>
10. Danilenko N.B., Savelev G.G., Yavorovskii N.A., Khaskel'berg M.B., Yurmazova T.A., Shamanskii V.V. Water purification to remove As(V) by electropulse treatment of an active metallic charge. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2005. Vol. 78. No 10. Pp. 1631–1635.
11. 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)
12. 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>
13. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Lopatko K.G., Aftandilyants E.G. Application of volume electric spark dispersion for production steady to sedimentation hydrosols of biological active metals. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2009. Issue 22. Pp. 74–79. (Rus)
14. Lopatko K.G., Melnichuk M.D. Physics, synthesis and biological functionality of nanosize objects. Kyiv: Vidavnychij centr Natsionalnogo Universitetu Bioresursiv i Priridokoristuvannya Ukraini, 2013. 297 p. (Ukr)
15. Borisevich V.B., Kaplunenko V.G., Kosinov N.V., Borisevich B.V. and all. Nanomaterials and nanotechnology in veterinary practice. Kyiv: Avitsena, 2012. 512 p. (Rus)
16. Shcherba A.A. Installation of electroerosive dispersion of conductive materials. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika*. 1990. No 3. Pp. 88–92. (Rus)

17. Shcherba A.A. Thyristor power supply systems of technological plants with parametric stabilization of output characteristics. *Sbornik nauchnykh trudov Preobrazovaniye i stabilizatsiya parametrov elektricheskoy energii*. Kiev: Institut elektrodinamiki Natsionalnoy Akademii nauk Ukrainy, 1996. P. 18–27. (Rus)
18. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Shevchenko N.I., Suprunovskaya N.I. Thyristor Discharge Pulse Generator with Controllable Parameters for Thechnological System for Volumetric Electric Spark Dispersion of Metal Granules. *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematychnyi vypusk Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist*. 2005. Part 1. Pp. 57–60.
19. Shcherba A.A. Principles of construction and stabilization of parameters of semi-conductor electro-pulse systems for electro-spark dispersion of current-conducting materials layer. *Sbornik nauchnykh trudov. Stabilizatsiia parametrov elektricheskoi energii*. Kiev: Institut elektrodinamiki Akademii nauk Ukrainy, 1991. Pp. 12 – 30. (Rus)
20. Shcherba A.A. The basic principles of the construction of multiphase stabilized power supplies for installations of electroerosive dispersion of metals in liquids. III-rd All-Union Conference *Problemy preobrazovatelnoy tekhniki*. Kiev, Ukraine, 1983. Part 5. Pp. 59–62. (Rus)
21. Zakharchenko S.N. Features of electromagnetic processes in the installations of spark erosion coagulation for water treatment systems of heat networks and units. *Novyny Enerhetyky*. 2012. No 6. Pp. 41–48. (Rus)
22. Zakharchenko S.M. Statistical Research of Equivalent Electric Resistance of the Heterogeneous Current-carrying Medium at its Electroerosive Processing on an Example of Granules of Aluminum in Water. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2013. No 1 (133). Pp. 62–67. (Ukr)
23. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Ivashchenko D.S. Determination of Probabilistic Properties of Electrical Characteristics of Circuits of Electric Discharge Installations taking into Account their Stochastically Changing Parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 4. Pp. 3–11. (Rus)
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.003>
24. Shydlovskaya N.A., Zakharchenko S.N., Cherkasskyi 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. 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)
26. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskyi O.P. Parametric Model 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>
27. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I. The influence of repetition rate of discharge pulses on electrical resistance of current-conducting granular layer during its electric-spark treatment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2006. No 2. Pp. 10–14.
28. Zakharchenko S.M. Increase of Efficiency of Obtaining of Ultradispersive Metals Particles by Volume Electroerosive Dispersion their Granules in a Liquid. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2013. No 1. Pp. 16–23. (Rus)
29. Shidlovskii A.K., Suprunovskaya N.I. Energy processes in the electrical circuits of discharge-pulse installations with a capacitive energy storage device while limiting the duration of its discharge to the spark load and non-zero initial conditions. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2010. No 1. Pp. 42–48. (Rus)
30. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Transient Analysis in Circuits of Electric Discharge Installations with Voltage Feedback taking into Account the Recovery Time of Locking Properties their Semiconductor Switches. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 3. Pp. 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.03.043>
31. Rudenko V.S, Senko V.I, Chizhenko I.M. Conversion techniques. Kyiv: Vyscha shkola, 1983. 431 p. (Rus)
32. Livshitz A.L., Otto M.Sh. Pulse Electrical Engineering. Moskva: Energoatomizdat, 1983. 352 p. (Rus)
33. Zakharchenko S.N., Kondratenko I.P., Perekos A.E., Zalutsky V.P., Kozyrsky V.V., Lopatko K.G. Influence of discharge pulses duration in a layer of iron granules on the size and structurally-phase conditions of its electroerosion particles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. Vol. 6. No 5 (60). Pp. 66–72. (Rus)
34. Shcherba A.A., Zakharchenko S.N., Suprunovskaya N.I., Shevchenko N.I., Monastirskiy G.E., PeretyatkoYu.V., Petruchenko O.V. Stabilization of modes of electrotechnological systems of obtaining spark-eroded micro and nano powders. *Tekhnichna Elektrodynamika. Tematichnyi vypusk Silova elektronika ta energoefektyvnist*. 2006. Vol. 1. Pp. 120-123. (Rus).
35. Zakharchenko S.N., Rudenko Yu.V. Comparative analysis of capacitors pulse charge algorithms at the systems of plasma-erosive treatment for heterogenic current-conductive mediums. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2014. Issue 37. Pp. 100–108. (Rus).
36. Zakharchenko S.N., Rudenko Yu.V., Cherkassky A.P. Improving the Accuracy of the Voltage Regulation in the Capacitive Energy Storage Devices for Pulse Plasma-erosion Treatment Systems of Heterogeneous Conductive Media. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 6. Pp. 30–37. (Rus). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.06.030>

Надійшла 21.02.2020

Остаточний варіант 17.04.2020