

О.І. Христо

Аналіз енергетичних характеристик транзисторного генератора імпульсів у процесі електроіскрового диспергування струмопровідних гранульованих середовищ

Вступ. Дослідження електрофізичних і технологічних аспектів електричного розряду в реакційних камерах з гранульованим металевим навантаженням для одержання його високодисперсних станів ведуться вже на протязі багатьох десятиліть, проте джерела живлення установок електроіскрового диспергування на сьогодні залишаються переважно класичними щодо способу генерації імпульсів струму в електроіскрове навантаження. Основною **проблемою** використання формувачів потужних імпульсів струму та реакційних камер з плоско-паралельною системою електродів є наслідування принципу термовибухового механізму розвинення електричного пробою щільних міжгранульних проміжків, що призводить до псування дисперсності еродованого матеріалу, а використання менших діапазонів енергії (<1 Дж) у таких установках ускладнюється через електрофізичні обмеження існування плазмових каналів та втрату енергоефективності процесу електроіскрової обробки. **Мета.** Дослідження енергоефективності процесу електроіскрового диспергування гетерогенних струмопровідних гранульованих середовищ у реакційній камері з циліндричною системою електродів за умови її живлення від транзисторного генератора імпульсів. **Результати.** Проведено порівняльний аналіз поведінки характеристик середньої споживаної потужності транзисторного генератора імпульсів в залежності від насипного об'єму навантаження та діаметру зовнішнього електрода реакційної камери для металевих гранул з різною величиною їх міжконтактного активного опору до утворення у середовищі ланцюжків наскрізної провідності. Визначені питомі енергозатрати у процесі електроіскрового диспергування алюмінієвих та титанових гранул, що корелюють з показниками середньої споживаною потужністю обробки в залежності від їх насипного об'єму у межах певної конфігурації електродної системи. **Наукова новизна.** Присутність струму крізь контактний опір до формування основного розряду у міжгранульних об'ємах реакційної камери викликає падіння напруги на індуктивності розрядного контуру, що відповідно зменшує амплітуду прикладеної напруги до міжелектродного проміжку, через що максимум характеристики середньої споживаної потужності транзисторного генератора імпульсів, який виникає до початку ділянки насичення кривої ефективної частоти розрядних імпульсів відповідає найбільш погодженому режиму введення енергії в електроіскрове навантаження. **Практична значимість** отриманих результатів розглянутої моделі електророзрядної установки доводить доцільність її використання для задач електроіскрової обробки струмопровідних гранульованих середовищ. Бібл. 21, табл. 2, рис. 7. **Ключові слова:** енергетичні характеристики, електроіскрове диспергування, транзисторний генератор імпульсів, циліндрична система електродів, шар металевих гранул, струм омичних контактів.

Постановка задачі. Одним з широко застосовуваних методів для отримання порошків, як чистих металів, так й сполук на їх основі, є метод електроіскрового диспергування (ЕІД) металевих гранул [1–3] занурених у рідину з відносно малою електропровідністю. Як відомо, особливість електроіскрового методу диспергування полягає у наявності двох найбільш вірогідних шляхів розвинення іскрового розряду між сусідніми поверхнями контактуючих гранул [4]: теплового пробою у зоні контактних мікроступів, спричиненим протіканням високою щільністю струму та електричного пробою за рахунок присутності поверхневих оксидних плівок або кавітаційних бульбашок. Тому той чи інший механізм пробою буде відбуватися в залежності від поверхневої чистоти металу та спроможності контактуючих поверхонь гранул к утворенню провідних мостиків між ними. Але незважаючи на те за яким механізмом утворюється іскровий розряд, процес формування ерозійних частинок в основному може відбуватися за рахунок теплоти топлення або випаровування локальних зон металу, що взаємодіють з нерівноважною плазмою високоенергетичних електронів. Баланс між енергією плавлення та випаровування буде залежати від швидкості введення енергії у сформований канал, його ступеня іонізації, температури та електричного опору. Регулювання цього процесу ускладнюється тим, що вольт-амперна характеристика іскрового розряду має спадаючий характер та приводить до лавиноподібного зростання струму, що потребує застосування параметричних методів контролю процесу передачі енергії до навантаження. Тобто утворюється позитивний зворотний зв'язок за струмом між джерелом живлення та навантаженням, що може призводити до критичного

розігрівання контактних зон, їх зварювання або навпаки скіпання та вихлюпування значної кількості крупної фракції металевих частинок у навколишню рідину. Найчастіше ці явища відбуваються через наявність у середовищі великої кількості щільних контактних зон між поверхнями гранул, що мають малий активний опір та протидіють сприятливим умовам розвитку реакції електроіскрової обробки. Для їх руйнування у лабораторній практиці зазвичай використовують накопичені високі енергії та тривалі розрядні струми. Водночас у роботі [5] повідомляється, що енергія на більш затяжній ділянці імпульсу переважно витрачається на розігрів середовища або електрохімічні реакції у ньому за рахунок посилення процесів рекомбінації та згасання плазмових каналів.

У напрямку покращення показників ефективності передачі енергії у електроіскрове навантаження (ЕІН) розроблено багато підходів, які застосовують нелінійні, параметричні або нелінійно-ймовірнісні моделі його динамічного опору [5–7]. Також останнім часом практикуються спектрометричні методи аналізу плазмових каналів, які за рахунок потужності та кольору випромінювання надають інформацію про їх кількість та розподіл енергії між ними, від чого залежить розмір частинок та продуктивність їх отримання [8, 9]. Зі свого боку, для синтезу ерозійних частинок з контрольованим розміром та зменшеним діапазоном їх розкиду, плазма у об'ємі, що заповнений багатьма шарами металевих гранул (ОБШМГ) повинна бути більш «холодною», а це можливо за рахунок обмеження амплітуди та тривалості імпульсів розрядного струму.

© О.І. Христо

Аналіз останніх досліджень й публікацій. На сьогоднішній день у лабораторних установках для ініціювання процесу ЕІД гетерогенних струмопровідних гранульованих середовищ застосовують як високовольтні формувачі однократних потужних імпульсів, так і напівпровідникові генератори імпульсів мікро- та субмікросекундної тривалості [10, 11]. Перевагою високовольтної електроіскрової обробки [12, 13] є висока швидкість формування передніх фронтів та можливість використання широкого діапазону енергій ($0,1-10^3$ Дж), а також довгих міжелектродних проміжків (МЕП) реакційної камери. Але головним недоліком таких систем є низька частота відтворення процесу ЕІД через використання газонаповнених комутаторів або повітряних розрядників. Більш перспективним напрямом високовольтної імпульсної техніки у напрямку підвищення ефективності ЕІД є використання індуктивних накопичувачів енергії у поєднанні з дрейфовими діодами [14], що дозволяє стабілізувати струм у навантаженні зі стрімко спадаючою вольт-амперною характеристикою.

На відміну від цих систем тиристорні або транзисторні перетворювачі характеризуються високою частотою проходження імпульсів ($0,1-10$ кГц) та діапазоном енергій від частки до сотень джоулів. Наприклад, дво-контурні зарядно-розрядні схеми тиристорних генераторів [15] зарекомендували себе як надійне рішення для формування на низькоомному навантаженні достатньо тривалих кілоамперних імпульсів аперіодичного характеру з високою швидкістю зростання їх переднього фронту за умови мінімізації індуктивності (1 мкГн) розрядного контуру ємнісного накопичувача енергії (100 мкФ). Проте, головним недоліком цих перетворювачів є обмеження точності регулювання тривалості струму, а використання перезарядних ланок або ланок, що шунтують навантаження, тільки збільшують додаткові енерговитрати та зменшують коефіцієнт корисної дії таких пристроїв. Крім того, стохастичне підвищення еквівалентного опору ОБШМГ може призводити до аварійних режимів роботи тиристорних ключів. У випадку зтягнутого імпульсу струму через навантаження розрядний тиристор може залишатися у стані провідності до приходу наступного зарядного циклу, що спричиняє протікання наскрізного струму від джерела живлення до навантаження. Також слід зазначити, що енергоєфективність таких пристроїв суттєво зменшується при використанні ємності робочого конденсатора менше 20 мкФ та формуванні імпульсів тривалістю менше ніж 15 мкс. З точки зору дисперсності матеріалу основною проблематикою введення потужних імпульсів у середовище є поява небажаної мікрофракції ($10-100$ мкм), що утворюється переважно за рахунок крапельного механізму конденсації частинок металу.

Транзисторні перетворювачі для задач ЕІД на сьогоднішній день не набули достатньої популярності, тому що мають значно менші граничні параметри по амплітуді струму та швидкості його зростання ніж тиристорні, проте головна їх перевага це можливість регулювання тривалості струму за умовою їх жорсткої комутації або динамічного підлаштування під період коливань контуру. Наприклад, у роботі [16] для отримання наночастинок заліза використовувався генератор квазіпрямокутних імпульсів струму тривалістю від

$0,5$ до 5 мкс на базі послідовного широтно-імпульсного перетворювача понижуючого типу. Як відмічають автори роботи, перед початком експерименту поверхня металевих гранул пройшла ретельну очистку від небажаних окисних плівок. Можна припустити, що за цих умов механізм формування електроерозії здебільшого йшов по шляху теплового пробою утворених провідних мостиків. Зважаючи на те, що максимальна амплітуда струму у поставленому експерименті становила лише 48 А, тому у разі великої кількості сформованих контактів по довжині камери та малої тривалості імпульсу такої сили струму може бути замало для ефективного ініціювання механізму теплового пробою і формування іскрових каналів, а відповідно введена енергія у середовище більш вірогідно буде йти на теплове розсіювання. Що стосується раціонального вибору геометричних параметрів реакційної камери, форми електродної системи та насипної висоти ОБШМГ з позиції їх впливу на енергетичні показники ЕІД, то у багатьох публікаціях [15, 17] надається лише емпірична оцінка, посилаючись на діапазон стабілізації обробки за відсутності режимів неробочого ходу та короткого замикання.

Відокремлення раніше не вирішеної частини завдань. У цілому розглянуту проблематику ЕІД металевих матеріалів можна розділити на два шляхи – застосування більш тривалих імпульсів з високою енергією (1 Дж – 1 кДж) або більш коротких імпульсів з енергією до частки джоуля. Основною проблемою зі введенням значної кількості енергії у локальні зони є псування ерозійних часток через їх агломерацію. По-перше, локальний перегрів контактних мікроступів спричиняє тепловий пробій та ініціює вибухову хвилю, що по собі є неконтрольованим процесом. По-друге, реакція плазموутворення має стохастичний характер, а кількість плазмових каналів і співвідношення енергії між ними у ОБШМГ розподіляються випадково, тому існує вірогідність введення значної кількості енергії тільки в окрему локальну зону плазموутворення, замість її рівномірного розподілення по всьому об'єму середовища. З іншого боку, при застосуванні малих енергій плазмові канали тривають менше часу, мають менший діаметр та відповідно зону розігріву та дозволяють проводити так би мовити «точкове розпилення» поверхні матеріалу, що відповідно покращує дисперсійний розподіл та впорядкованість структуроутворення ерозійних частинок. Але головна проблематика у цьому діапазоні енергій полягає у тому, що генератори коротких імпульсів працюють переважно за механізмом електричного пробою проміжку та вкрай чутливі до утворення у середовищі провідних мостиків, тому що для їх руйнування потрібно ввести значно більшу енергію для реалізації механізму теплового пробою. За умови стохастичного характеру зміни опору ЕІН, кількість введеної енергії у плазмові канали від імпульсу до імпульсу може суттєво змінюватися й залежить від багатьох факторів як умов попередньої іонізації контактних проміжків, напруженості поля між ними, шорсткості поверхонь, щільності струму між мікроступами та інше. Водночас для оцінки ефективності процесу ЕІД достатньо спиратися на середнє значення введеної енергії у плазмові канали за певний проміжок часу, яка безпосередньо впливає на сумарну масу еродованого металу, що виноситься з контактних лока-

льних зон між гранулами як результат підводу теплоти розтоплення або випаровування. Таким чином, пошук умов підвищення саме корисної потужності від генератора імпульсів, що йде на розігрів локальних зон та утворення еродованих частинок металу у напрямку покращення показнику енергоефективності ЕІД гетерогенного струмопровідного гранульованого середовища залишається актуальним завданням.

Мета роботи – дослідження енергоефективності процесу електроіскрового диспергування гетерогенних струмопровідних гранульованих середовищ у реакційній камері з циліндричною системою електродів за умови її живлення від транзисторного генератора імпульсів.

Особливості пропонованої системи ЕІД. На відміну від існуючих реакторів ЕІД, які мають прямокутну форму та однакові з плоскою формою електродів у вигляді пластин, розташованих на відстані в середньому 40–50 мм, то в цій роботі пропонується проводити обробку в реакційній камері з циліндричною системою електродів. Відстань між електродами виставлялась дещо зменшеною у межах 20–35 мм для збільшення енерговкладу у контактні зони між поверхнями гранул. Кутова симетрія радіальної напруженості електричного поля циліндричної системи електродів на відміну від плоскої системи, де напруженість поля найбільша по краях електродів, дозволяє застосовувати менші технологічні проміжки за умови дотримання рівномірного розподілення плазмових каналів по об'єму реакційної камери. Також до конструкції реакційної камери входить механічний перемішувач, який представляє собою диск з вертикально закріпленими стрижнями на певній відстані відносно його осі обертання, що своїми краями занурюються у ОБШМГ та практично притуляються до низу камери. Диск зі стрижнями кріпиться на валу редукторного механізму та за допомогою крокового двигуна приводиться у рух. У свою чергу стрижні своїми краями торкаються прилеглих гранул та примушують їх перемішуватися, надаючи їм поступальні та обертальні рухи.

У якості джерела живлення реакційної камери застосовується двоконтурна схема транзисторного генератора імпульсів (ТГІ) (рис. 1), що містить зарядний C_0 - VT_0 - VD_0 - L_0 - C_1 та розрядний C_1 - VT_1 - VD_2 - L_1 - R контури. Цей перетворювач по своїй структурі подібний до двоконтурних тиристорних пристроїв [6, 18], що використовують ланки перезаряду робочого конденсатора, але з тою особливістю нижче зазначеного схемного рішення, що функцію обмежувача струму цієї ланки виконує зарядний дросель L_0 . Швидкодіючі діоди, що стоять послідовно з транзисторами, запобігають відпирранню зворотних інтегрованих діодів та обмежують електричні коливання у кожному контурі до одного півперіоду струму. Випрямлена напруга на вході перетворювача задається від 400 до 500 В та контролюється лабораторним автотрансформатором. За рахунок резонансної зарядки робочого конденсатора C_1 напруга на ньому може підійматися до 800 В.

На відміну від існуючої загальноприйнятої практики живлення реакційних камер ЕІД із застосуванням конденсаторів з номіналом, що найменше 25 мкФ та енергією від 2 Дж і більше, у поставлених експериментах діапазон енергій, яким оперує генератор, не перевищував 1/3 Дж. Параметри розрядного контуру

вибирались такими, щоб його характеристичний опір становив 4 Ом.

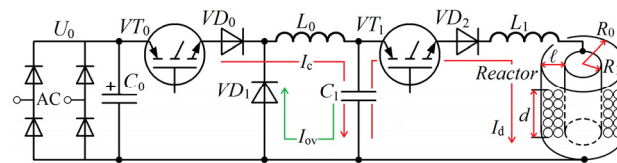


Рис. 1. Принципова схема ТГІ з навантаженням у вигляді реакційної камери з циліндричною системою електродів

Важливою функцією зворотного діода VD_1 , що розміщено паралельно робочому конденсатору C_1 є запобігання неконтрольованого наростання напруги на ньому через його резонансний заряд при ненульових початкових умовах, викликаних неузгодженістю розрядного контуру у зв'язку зі стохастичним характером еквівалентного опору ЕН. Попри те, що зарядна напруга на C_1 у процесі ЕІД у певному енергетичному діапазоні коливань генератора може мати модуляційну складову, однак при цьому таке рішення дозволяє генератору надійно працювати від режиму неробочого ходу до режиму короткого замикання. Наприклад, характерною ознакою режиму короткого замикання є стаціонарність його коливань, протягом якого заряд ємності C_1 відбувається за умови незмінної додатної залишкової напруги на ньому. Поява від'ємної залишкової напруги на C_1 свідчить про те, що еквівалентний опір навантаження нижче за характеристичний опір розрядного контуру. Така ситуація може виникати як при утворенні струмопровідних мостиків, так і плазмових каналів. Однак кожного разу, коли на C_1 з'являється від'ємна напруга, то вмикається діод VD_1 , що викликає збудження зворотного коливання та повертає напругу на C_1 до полярності вхідного джерела постійного струму. На рис. 2 представлені такти заряду, розряду та перезаряду C_1 .

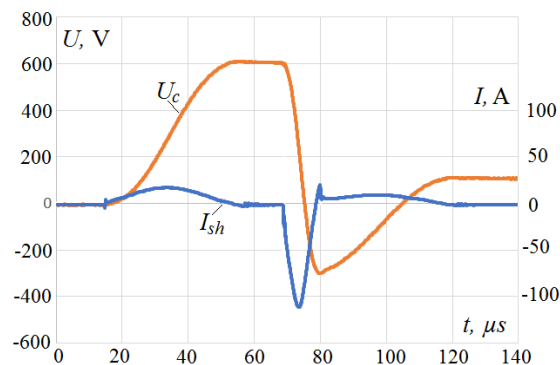


Рис. 2. Синхронні осцилограми струму та напруги робочого конденсатора C_1 у процесі ЕІД

За допомогою цифрової системи керування часові інтервали комутації кожного з транзисторів можуть виставлятися довільно. Проте, на відміну від VT_1 , комутацію запирання VT_2 можливо проводити тільки за умови досягнення розрядного струму точки нульового значення. Зворотний швидкодіючий діод VD_1 відіграє також вторинну функцію, подібно як у схемі одноконтурного понижуючого перетворювача напруги, замикаючи на себе залишковий струм намагнічування зарядного дроселя L_0 .

У процесі ЕІД плазмові канали утворюються хаотично, через це вкладена енергія у кожному імпульсі

буде різною, на що вказує залишкова напруга на C_1 (рис. 3), яка має сходинкоподібний характер. Але такий режим коливаний генератора більш виражений тільки на певній ділянці енергетичної кривої, де процеси передачі енергії у ЕІН мають розгалужений характер.

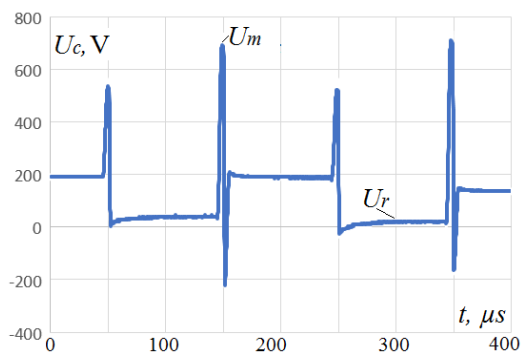


Рис. 3. Сходинкоподібна напруга робочого конденсатора C_1 у процесі ЕІД

Для виміру активної миттєвої потужності та споживаної енергії в установці використовується побутовий енергометр (модель ТМ55), який підключається між входом генератора та первинною мережею змінного струму. Експериментально встановлено, що для металевих гранул, які схильні до утворення провідних ланцюжків, таких як Ti , Cu , Fe , у результаті режиму умовно короткого замикання, потужність генератора приблизно в 2 рази менше (30 Вт), ніж для режиму, коли ініціюється реакція електроіскрової обробки з мінімальною моношаровою висотою металевих гранул. У такому випадку динаміка напруги та струму на ємності C_1 мають високу стаціонарну стабільність усталеного режиму коливаний генератора. Так як електричний опір провідних мостиків багато нижчий за характеристичний опір розрядного контуру, то лише частка енергії C_1 буде розсіюватися у ОБШМГ та на активних елементах контуру. Крім того, усталена напруга на C_1 між тактами перетворення енергії буде наближеною до напруги джерела живлення. В іншому випадку у разі завантаження у реакційну камеру гранул Al , що схильні до утворення оксидних плівок на їх поверхнях, у генераторі може спостерігатися режим, наближений до неробочого ходу. У цьому режимі коливаний крива напруги на C_1 буде мати також стаціонарний характер, але відрізнятися наявністю тільки доданої амплітуди пульсацій та ще меншою споживаною потужністю. Крім того, незначна частина накопиченої енергії C_1 буде розсіюватися у середовищі через втрати на електроліз та електрохімічні реакції у рідині.

Однак, як помічено, що зрушення системи зі стану умовно спокою (режим неробочого ходу або короткого замикання) у бік запалювання реакції плазмоутворення та ініціювання процесу ЕІД можливо за рахунок попереднього механічного зміщення кожної металевої частки ОБШМГ. Тобто примусове руйнування провідних мостиків або оксидних плівок на контактних поверхнях між гранулами створює умови для попередньої іонізації середовища та утворення плазмових каналів. Для цього у конструкції камери, як зазначено вище, задіяний механізм примусового збурювання та активації середовища. Для уникнення ситуації блокування руху механічного перемішувача через взаємне зчеплення гранул між

собою їх форма вибиралась наближеною до квазісферичної. Крім того, було також помічено, що для гранул, які мають гладку поверхню та утворюють більш щільні контакти між собою, складно навіть їх переміщенням остаточно досягти межі запалювання реакції самопідхоплення механізму ЕІД. Проте, за рахунок безперервного перемішування середовища від механічного збурювача та підтримування реакції ЕІД транзисторним генератором імпульсів, гладка поверхня металевих гранул (Ti , Cu , Fe) поступово вкривається ерозійними лунками та стає більш шорсткою з утворенням більшої кількості мікроступів. Це дає змогу через деякий час примусового перемішування середовища ініціювати реакцію самопідхоплення «безперервного» плазмоутворення електроіскрової обробки, після чого подальше перемішування гранул вже має опосередковану дію та може бути призупинено. У ході досліджень на прикладі з гранулами Al також було помічено, що потужність ТГІ навіть зростала зі збільшенням частоти обертання стрижневого механізму. Треба відмітити, що для переважної частини групи гранул додаткове збурення було до речним тільки на стадії активації їх поверхонь, тому що викликало деяку нестабільність та переривчастість запалювання плазмових каналів. Реалізація такого доповненого способу обробки також відмічається у літературі, але при застосуванні інших механізмів збурення середовища. Зокрема, у [19] відзначено, що просторовий коливальний рух гранул відносно їх статичного положення у результаті дії додаткового джерела механічних збурень (вібрація, ультразвук) примусово впливає на довжину плазмових каналів, стримує їх розвиток, лімітує підведену енергію до них, посилює їх міграцію по поверхні гранул, що у цілому підвищує дисперсність ерозійних частинок та енергоефективність обробки. Але, з іншого боку, застосування додаткового механізму та надмірного зворушення середовища може істотно погіршити загальну енергоефективність електроіскрової обробки.

Постановка експерименту. Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- вимірювання показників споживаної потужності електророзрядної установки від електромережі живлення в залежності від конструкційних параметрів реакційної камери та особливостей ОБШМГ при інших фіксованих параметрах ТГІ (максимальна зарядна напруга та енергія робочого конденсатора, частота та тривалість імпульсів);
- оцінка взаємозв'язку показників потужності електроустановки з питомими енерговитратами процесу ЕІД металевих гранул з різним значенням їх міжконтактного активного опору (Al , Ti) у перерахунку на кВт·год/кг;
- аналіз електрофізичних процесів ЕІД для визначення ефективних режимів передачі енергії від ТГІ у нелінійне ЕІН.

Для ясності викладення методики експерименту було визначено вхідні та вихідні дані, якими оперує електрофізична модель ТГІ – ЕІН.

Фіксовані параметри ТГІ та реакційної камери: напруга на вхідній електролітичній ємності C_0 – 420 В; максимальна зарядна напруга та ємність робочого конденсатора C_1 – 750 В та 1 мкФ; індуктивність розрядного контуру L_0 – 14,6 мкГн; частота перетворення генератора – 1 кГц; максимальна тривалість імпульсу стру-

му – 12 мкс; робоча рідина – вода з питомою електропровідністю 30–50 мкСм/см; діаметр внутрішнього електроду 30 мм; тривалість процесу ЕІД – 10 хв.

Регульовані параметри установки: технологічний проміжок між циліндричними електродами реакційної камери; маса гранульованого матеріалу до початку диспергування – m_i , г; висота та кількість елементарних шарів ОБШМГ – h_i , мм, N_{sh} ; діаметр зовнішнього електроду; середній діаметр гранули (квазісферичне наближення).

Вихідні параметри технологічного процесу після обробки: середня потужність споживаної енергії електророзрядної установки від електромережі живлення – P , Вт; залишкова маса гранульованого матеріалу після обробки – m_{ex} , г; маса диспергованого матеріалу – Δm , г; питомі затрати електроенергії на диспергування гранульованого матеріалу – Q , кВт·год/кг.

Концентрація гранул металів (Al , Ti) розраховувалась за допомогою мірного стакану з робочим об'ємом 50 мл з висотою 125 мм та діаметром 22 мм. Потім після перерахунку кількості гранул у насипному об'ємі визначались їх середня концентрація N_a на 1 cm^3 та після зважування – їх насипна щільність. Середній діаметр гранул отримано у наближенні їх квазісферичної форми та за умови їх кубічної моделі розташування у просторі ($d_{Al} = 2,4$ мм, $d_{Ti} = 3,5$ мм). Для розрахунку насипної кількості шарів у аксіальному напрямку по довжині реакційної камери з циліндричною системою електродів використовувалась формула:

$$N_d = \frac{\sqrt[3]{N_a \cdot V_t}}{\pi \cdot (R_0^2 - R_1^2)}, \quad (1)$$

де R_0 , R_1 – зовнішній та внутрішній радіуси електродів; V_t – насипний об'єм металевих гранул; $\sqrt[3]{N_a}$ – кількість гранул на одиницю довжини у довільному напрямку. Величина $V_t/\pi \cdot (R_0^2 - R_1^2)$ – це висота ОБШМГ у аксіальному напрямку по довжині реакційної камери.

Вимірювання показників середньої потужності ТГП у процесі електроіскрової обробки в залежності від об'єму кожного з матеріалів проводилось у діапазоні їхніх ваг від 50 до 300 г з кроком аналізування через кожні 20 г та тривалості обробки не більше 30 с, таким чином, щоб як найменше вплинути на попередній початковий стан ОБШМГ у процесі ЕІД.

Виходячи з отриманого сімейства залежностей середньої потужності перетворювача від насипного об'єму гранул та діаметру зовнішнього електроду – $d_0=72$ мм, $d_1=82$ мм, $d_2=98$ мм (рис. 4,а,б), як для алюмінієвого, так і для титанового завантаження, можна стверджувати, що спільною рисою усіх кривих є наявність виразних максимумів потужності, які проявляються приблизно на одній й тій же висоті ОБШМГ (за певної кількості шарів) для кожного випадку геометрії металевих гранульованого завантаження. У діапазоні лівої ділянки ОБШМГ експериментальні залежності також мають подібний поступовий характер зростання, наближений до лінійного. Разом з тим, зі збільшенням діаметру зовнішнього електроду кутовий коефіцієнт нахилу кожної кривої сімейства зменшується, а їх максимуми збільшуються, що особливо відчутно для титанової засипки. Крім того, відмінною рисою є електрофі-

зичні особливості поведінки титанових гранул на задній частині їх залежностей, де потужність стрімко спадає. Це пояснюється тим, що енергії імпульсу, на якій виконувалося дослідження (0,25 Дж) виявляється вже не достатньо на цій ділянці ОБШМГ (правіше від максимуму) для безперервного утримання реакції плазмотворення і стабільного процесу електроіскрової обробки.

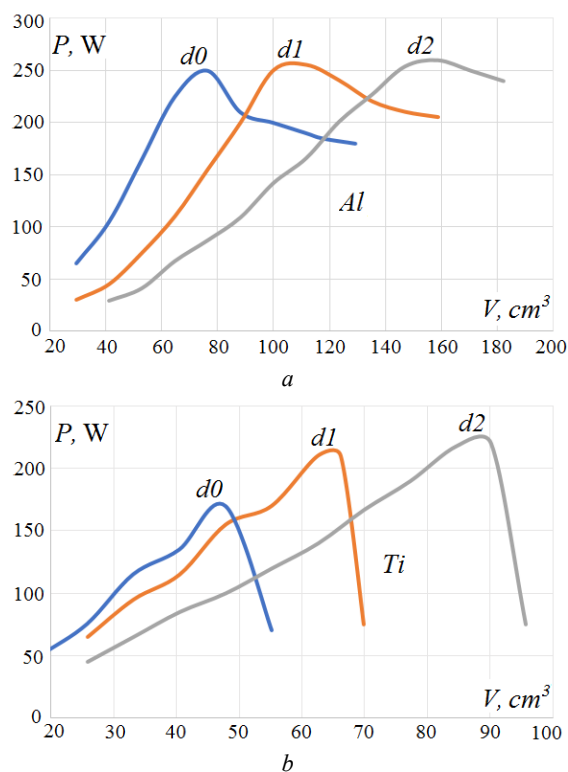


Рис. 4. Криві залежності потужності генератора від ОБШМГ реакційної камери для трьох значень діаметру зовнішнього електроду: а – гранули Al ; б – гранули Ti

Якщо в схемі генератора настає режим короткого замикання або наближений до нього, то у реакційній камері відбувається повне згасання розряду або реакція плазмотворення йде лише поблизу центрального електроду-аноду, а потужність процесу все одно залишається низькою (30–50 Вт). Максимуми кривих для алюмінієвої засипки мають менш виражений характер зростання зі збільшенням діаметру зовнішнього електроду, а їх задні частини поступово спадають в залежності від ОБШМГ. Слід також відзначити, що усі максимуми потужності P_{max} , як для алюмінію так і для титану зароджуються приблизно при одній й тій же висоті насипного об'єму гранул, або відповідно до кількості їх шарів (1). Тому для Al : $h_{Al} = 22$ мм, $N_i = 8$ шарів, для Ti : $h_{Ti} = 13,5$ мм, $N_i = 5$ шарів. У той же час значення максимуму потужності має тенденцію зростання при збільшенні довжини МЕР, на якому розміщується певна кількість гранул в залежності від їхнього діаметру. Для середньої кількості гранул у радіальному напрямку по довжині МЕР (R_0-R_1) реакційної камери відповідно для вище зазначеної моделі їх пакування маємо вираз:

$$N_i = \sqrt[3]{N_a} \cdot (R_0 - R_1). \quad (2)$$

Тому керуючись вище сказаним, можна припустити, що середня споживана потужність ТГП у процесі ЕІД металевих гранул є однозначною функцією, що зале-

жити певною мірою, як від початкової напруги на МЕП, енергії імпульсу та частоти їх проходження, так і від параметрів упакування ОБШМГ у реакційній камері – кількість елементарних шарів у насипному об'ємі металевих гранул та кількість гранул в одному їх шарі. Крім того поверхнева схильність гранул титану до утворення провідних мостиків у середовищі проявляється у стрімкому зниженні потужності ТПІ через настання режиму короткого замикання.

Наступним етапом роботи є визначення питомих затрат електроенергії у перерахунку на отримання 1 кг порошкової сировини. У цьому разі проводилось вже вимірювання накопиченого значення середньої потужності за більш тривалий проміжок ЕІД. Для *Al* гранул обробка проводилась із 72 мм діаметром зовнішнього електроду та фіксованими параметрами системи, що зазначено вище. Експериментальні та розрахункові дані по ЕІД гранул *Al* та *Ti* наведено у табл. 1, 2 відповідно. Електричні параметри ЕІД титанових гранул були обрані такі самі, як й для алюмінієвих гранул, але за винятком збільшеного діаметра зовнішнього електроду 82 мм.

Таблиця 1

Результати ЕІД алюмінієвих гранул

m_i , г	$m_{\text{ев}}$, г	Δm , г	V_i , см ³	h_i , мм	N_i , кіл.од.	P , Вт	Q , кВт·год/кг
50	48,68	1,35	29,4	8,5	3,2	65	8,02
70	67,52	2,48	41,2	11,8	4,5	105	7,1
90	85,12	4,88	52,9	15,2	5,8	165	5,6
110	103,22	6,78	64,7	18,6	7,1	225	5,4
130	121,62	8,38	76,4	22	8,4	250	5
150	143,25	6,75	88,2	25,4	9,8	210	5,13
170	163,85	6,15	100	28,7	11	190	5,2

Таблиця 2

Результати ЕІД титанових гранул

m_i , г	$m_{\text{ев}}$, г	Δm , г	V_i , см ³	h_i , мм	N_i , кіл.од.	P , Вт	Q , кВт·год/кг
70	69,32	0,68	25,7	5,5	2	65	15,9
90	88,78	1,22	33,1	7,1	2,7	95	13
110	108,14	1,86	40,5	8,7	3,4	130	11,8
130	127,6	2,4	47,8	10,3	4	155	10,7
150	147	3	55,2	11,9	4,6	170	9,5
170	166,15	3,85	62,5	13,5	5,2	210	9
190	175,5	4,5	66,2	14,3	5,5	230	8,5

Таким чином, отримані показники питомих витрат електроенергії у процесі ЕІД *Al-Ti* також корелюють з відповідними показниками їх середньої потужності. Для *Al* досягнуто нижчого значення енерговитрат диспергування ніж для *Ti* – 5 кВт·год/кг, але за умовою 20 Вт-ої переваги. Отримане значення Q корелює з показником, наданим у [20] – 5,45 кВт·год/кг. Проте, це значення Q досягнуто за дуже низькою продуктивністю електроіскрової обробки та потужності джерела живлення – упродовж 3 год обробки загальна маса *Al* гранул та електродів зменшилася лише на 1,8 г. Найменше значення показника Q для *Ti* – 8,5 кВт·год/кг було досягнуто тільки при збільшенні вхідної напруги живлення генератора до 450 В, що дозволило стабілізувати процес плазмоутворення, та незважаючи на тенденцію на рис. 4, *b* підняти потужність обробки. З урахуванням визначеної маси еродованого матеріалу, що отримано на протязі часу його обробки та частоти проходження імпульсів генератора можна розрахувати долю частинок, що утворюються за один розрядний імпульс – $m_0 = \Delta m / (T \cdot f) = \Delta m / 6 \cdot 10^5$. Відповідно маємо: $m_{0Al} = 13,9$ мкг,

$m_{0Ti} = 7,5$ мкг. Далі, спираючись на термодинамічні рівняння [21] та відповідні теплофізичні коефіцієнти для *Al-Ti*, визначаються енергозатрати, які йдуть на топлення E_m та випаровування E_v цієї частки еродованого матеріалу. Тому для *Al*: $E_m = 13,5$ мДж, $E_v = 189$ мДж; *Ti*: $E_m = 9$ мДж, $E_v = 84$ мДж. Середня енергія імпульсу для *Al* – 250 мДж, для *Ti* – 210 мДж. Якщо припустити, що всі еродовані частинки проходять повністю стадію випаровування, тоді ефективність ЕІД по відношенню до енергії E_v становитиме: *Al* – $\eta = 76$ %, *Ti* – $\eta = 40$ %. Водночас енергія E_v для *Ti* у перерахунку на одну й ту ж саму масу матеріалу на 17 % нижче ніж для *Al*. Якщо звернутись до рис. 4, *b*, то потужність генератора має тенденцію зростання, проте не досягає порогу свого насичення через припинення реакції плазмоутворення. Наприклад, при діаметрі зовнішнього електроду 98 мм падіння потужності генератора відбувається після 90 см³ об'єму, що заповнений металевими гранулами. Для цієї геометрії ОБШМГ, енергозатрати вдасться знизити вже до рівня 8,3 кВт·год/кг. Тому цей показник ще раз підтверджує ту реальність, за якою зі збільшенням кількості контактів між гранулами по довжині МЕП та зі збільшенням кількості шарів по висоті реакційної камери відбувається поступове зростання потужності генератора та зниження показника питомих енергозатрат ЕІД до настання порогу його насичення.

Важливою стороною дослідження є все ж таки пояснення поведінки отриманих експериментальних залежностей середньої потужності на кожній ділянці ОБШМГ. Тому для вирішення цього питання проведено вимірювання вольт-амперних характеристик як на електроді камери, так і на елементах ТПІ. Перетворення електричних коливань до рівня амплітуд сигналів безпечних для осцилографування виконано за допомогою дільника напруги змішаного типу з коефіцієнтом передачі 1:46,5 та коаксіального шунта струму з активним опором 1,55 мОм. Обидва сигнали надходять через коаксіальні лінії на входи двоканального запам'ятовуючого осцилографу SDS1022. Оцифровані дані зберігалися у текстовому форматі та переносилися у Excel для математичних розрахунків. Кількість точок дискретизації, що дає осцилограф по кожному каналу, становить 10^4 з інтервалом 10 нс та амплітудним значенням у мілівольтах. Результати оцифрування перетворювались з урахуванням вертикального зсуву та коефіцієнту передачі по кожному сигналу. Після опрацювань багатьох синхронних пар осцилографічних даних було з'ясовано, що ефективність запалення плазмових каналів зростає з кожним доданим шаром металевих гранул реакційної камери. При початкових рівнях насипного об'єму спостерігається багато неефективних розрядів і від енергії робочого конденсатора відбирається лише незначна її частина. На цьому інтервалі ефективна частота розрядних імпульсів (ЕЧРІ) менша за частоту проходження імпульсів генератора. Відповідно до сходинкоподібної діаграми напруги на C_1 можна відокремити неефективні розряди від загальної їх кількості за певний проміжок часу, та за перепадами напруги від зарядної до залишкової на кожному такті комутації силових ключів розрахувати середню енергію та потужність перетворення. Для збереження точності оцифрування сигналу максимальна ширина вікна для

запам'ятовування даних на розгортці часу 1 мс/под. становила 20 мс. З точки зору більш коректного наближення до середніх значень потужності оброблялось по 5 діаграм напруги з загальним часом у 100 мс. Тому, відповідно до викладеного алгоритму, середню енергію ефективних розрядів (СЕЕР) можна розрахувати як:

$$E_a = \frac{\sum_{i=0}^{N_{sp}} E_i}{N_{sp}} = \frac{C}{2} \cdot \frac{\sum_{i=0}^{N_{sp}} (U_c^2 - U_r^2)_i}{N_{sp}}, \quad E_i \geq E_{th}, \quad (3)$$

де U_c , U_r – зарядна та залишкова напруги на C_1 ; C – ємність конденсатора C_1 , N_{sp} – кількість ефективних розрядів за вимірювальний проміжок часу; E_i – енергія ефективного розряду; E_{th} – мінімальний поріг енергії розрядного струму.

Вимірювання були проведені зі збереженням тієї ж самої геометрії електродів, як у попередньому експерименті. Відмітною особливістю отриманої кривої залежності ЕЧРІ для Al гранул (рис. 5,а) є наявність ділянки її насичення (75–100 cm^3), де частота ефективних розрядів збігається з частотою перетворення генератора 1 кГц. Середня енергія ефективних розрядів на цій ділянці об'ємів після досягнення свого максимуму (0,22 Дж) так само, як і середня потужність, поступово спадає. У випадку з гранулами Ti крива ЕЧРІ (рис. 5,б) відповідає частоті генератора тільки при його потраплянні у режим короткого замикання, а максимальне значення СЕЕР досягається на рівні 60 cm^3 ОБШМГ.

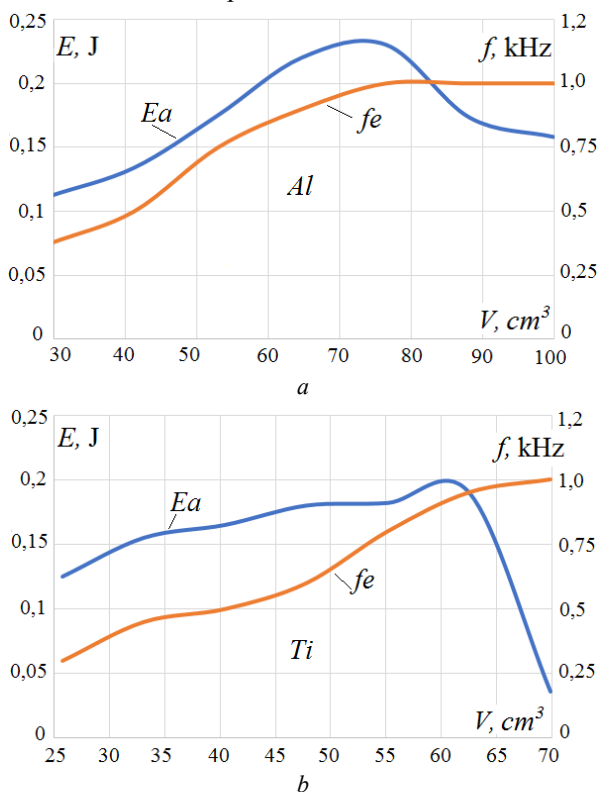


Рис. 5. Криві залежності середньої енергії та ефективної частоти розрядних імпульсів від ОБШМГ реакційної камери: а – алюмінієві гранули; б – титанові гранули

Стационарні електричні коливання у ТГІ на ділянці насичення кривої ЕЧРІ для Al на відміну від Ti відзначаються більшою стабільністю та меншим значенням зворотних переколювань. Тому за умови стабільності частоти розрядних імпульсів та їх амплітуди можна

зняти вольт-амперні характеристики у декількох точках ділянки насичення ЕЧРІ та виконати розрахунок миттєвої потужності та динаміки опору на навантаженні.

Еквівалентне значення опору R_{eq} ОБШМГ за час тривалості імпульсу зазвичай розраховується за формулою [6], але наближення до інтегральних виразів виконано за допомогою апроксимації по методу трапецій:

$$R_{eq} = \frac{\sum_{k=0}^n (u_k \cdot i_k + u_{k+1} \cdot i_{k+1})}{\sum_{k=0}^n (i_k^2 + i_{k+1}^2)}, \quad (4)$$

де u_k , i_k – миттєві значення струму та напруги у розрядному контурі на k -му кроці інтегрування.

Характеристики миттєвої потужності, що виділені на ЕІН, розраховані на основі отриманих пар синхронних осцилограм струму та напруги у 3-х точках ділянки насичення ефективного частоти розрядів (рис. 6).

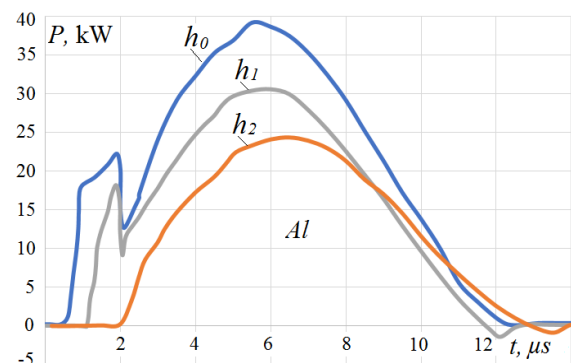


Рис. 6. Характеристики миттєвої потужності для 3-х рівнів висоти алюмінієвого ОБШМГ

Синхронізація усіх характеристик проводилась по першому швидко спадаючому фронту імпульсу напруги на МЕР, що відповідає моменту часу стадії остаточного електричного пробоя середовища та початку розвинення іскрового розряду з подальшою передачею основної долі енергії від ємнісного накопичувача енергії до навантаження. Як помітно з характеристик для рівнів засипки $h_0 = 22$ мм, $h_1 = 25$ мм, їхньою головною особливістю є наявність значного сплеску потужності до моменту розвинення плазмового каналу. Стрибок потужності головним чином пов'язаний з протіканням струму омичних контактів у локальних зонах між гранулами, розвиненням іонізаційних лавин та поляризацією робочої рідини у міжгранульних об'ємах. Треба зазначити, що остаточне значення напруги, яке встановлюється на МЕР після повного відпирання транзисторного ключа, буде передусім визначатися струмом омичних контактів навантаження та реактивними параметрами розрядного контуру. Протікання струму омичних контактів викликає падіння напруги на індуктивності дроселя L_1 , що відповідно зменшує максимальну амплітуду прикладеної напруги до МЕР, значення якої в свою чергу впливає на погодженість введення енергії у ЕІН. Як з'ясовано на основі аналізу багатьох синхронних пар вольт-амперних даних, напруга на МЕР ще деякий час тримається та залишається практично постійною, при цьому утворюється «плато» напруги до початку розвинення плазмового розряду. В свою чергу, від значення струму омичних контактів, що розігріває контактуючі поверхні гранул, буде залежати інтенсивність розмно-

ження електронних лавин та подальший розвиток плазмових каналів.

Зростання струму омичних контактів від висоти шару пояснюється збільшенням площі поверхні дотику гранул з електродами реакційної камери. Але в деякий момент при висоті ОБШМГ $h_2 = 29$ мм струм омичних контактів стає досить істотним та зливається зі струмом іскрового розряду, у той же час «плато» напруги – іонізаційна полка напруги повністю зникає, що погіршує розвиток плазмових каналів. Тому вигідно, як раз виконати витримку процесу іонізації, коли плато напруги на МЕР тримається ще деякий час, у середньому декілька мікросекунд, що важливо для збільшення кількості плазмових каналів та ефективності їх росту. Струм омичних контактів у цьому сенсі розігриває контактуючі шари гранул та стимулює термоелектронну емісію з їх поверхонь, що в свою чергу впливає на струм іонізації, який є тригером – первинним джерелом для формування плазмових каналів. З іншої сторони достатня різниця потенціалів між нагрітими поверхнями гранул створить умови для ефективного розмноження електронних лавин та утворення плазмових каналів.

Для розглянутого сімейства кривих миттєвої потужності за проміжок тривалості розрядів (12 мкс), розраховується енергія, що розсіюється у ЕІН. Знову ж таки, якщо інтеграл потужності за часом апроксимувати за методом трапецій, то можна отримати вираз:

$$E_a = 0,5 \cdot \sum_{k=0}^n (U_k \cdot i_k + U_{k+1} \cdot i_{k+1}) \cdot \Delta t, \quad (5)$$

де Δt – крок часу інтегрування, $\Delta t = 10$ нс.

Звідки маємо, що енергія для кривої h_0 дорівнює 240 мДж, h_1 – 190 мДж, h_2 – 160 мДж. Ці результати також корелюють зі значеннями, отриманими за (3) для кривої потужності генератора на рис. 4,а.

Щодо динаміки опору навантаження за часом (рис. 7), то кожна крива має своє початкове значення опору. Проте відмінною особливістю кривої h_2 є наявність нульового значення опору та його миттєвий стрибок за короткий проміжок часу з нульової відмітки до початкового значення R_0 .

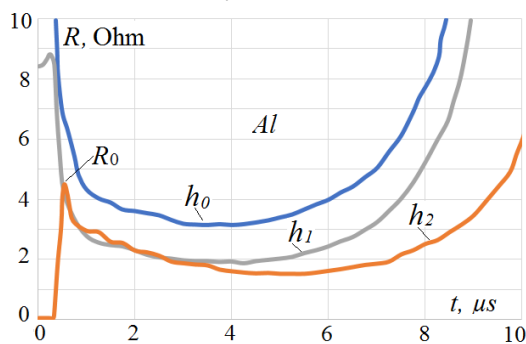


Рис. 7. Динаміка опору електроіскрового навантаження

На рівні висоти шару принаймні у 30 мм присутність струму зміщення міжгранульних об'ємів робочої ріднини стає суттєво помітною, що спричиняє появу реактивної складової у динаміці опору навантаження. Далі використовуючи (4) для усіх 3-х кривих h_0 – h_2 маємо наступні значення еквівалентного опору навантаження: h_0 – 3,95 Ом, h_1 – 2,41 Ом, h_2 = 1,84 Ом. Якщо характеристичний опір контуру C_1 – VT_1 – VD_2 – L_1 становить 4 Ом, то безумовно можна стверджувати, що осно-

вною причиною зниження СЕЕР зі зростанням ОБШМГ на ділянці насичення ЕЧРІ є зниження його еквівалентного опору. Через це перехідний процес у цьому контурі стає більш коливальним та розгалуженим [7].

У той же час значення R_{eq} корелюють з початковими значеннями опору на момент пробою МЕР, які теж мають тенденцію зниження – $R_0(h_0)=25$ Ом, $R_0(h_1)=8,5$ Ом, $R_0(h_2)=4,5$ Ом. Отриманий взаємозв'язок між висотою ОБШМГ та початковим опором ЕІН може бути також доповненням до параметричної моделі електроіскрового навантаження [4], де встановлена залежність цього опору від початкової прикладеної напруги до МЕР.

Іншою цікавою обставиною є те що присутність струму омичних контактів при комутації розрядного контуру тиристорним ключем важко помітити через його інерційні особливості – процес розігрівання міжгранульних проміжків та формування плазмових каналів зливаються у часі. Крім того, низьке значення індуктивності контуру тільки сприяє стрімкому розвиненню плазмового розряду та в принципі унеможливує розпізнавання цього явища. Як раз у роботі [17] надаються тільки приблизні інтервали існування кожного струму, тому що вольт-амперні характеристики на МЕР є подібні гладкій кривій потужності імпульсу у точці відчутного падіння контактного опору ЕІН, що зображено на рис. 6 (крива h_2). У цьому сенсі перевагою саме транзисторного комутатора є можливість швидкого прикладання напруги до МЕР та одразу відокремлення декількох стадій розвинення іскрового розряду у об'ємі металевого навантаження реакційної камери.

Висновки.

1. Запропонована модель електророзрядної установки – ТГІ з максимальною напругою імпульсів до 800 В та енергією до 0,3 Дж у поєднанні з реакційною камерою з циліндричною системою електродів підтверджує свою ефективність для задач ЕІД гетерогенних струмопровідних гранульованих середовищ з різною мірою активності міжконтактного опору.

2. Встановлено, що середня споживана потужність ТГІ при роботі на ЕІН за умови фіксованої вхідної напруги живлення та частоти проходження імпульсів виявляється залежною від геометричних розмірів металевого навантаження у реакційній камері – кількості його шарів та кількості гранул по довжині МЕР у одному шарі. Крім того, на характер потужності ТГІ після досягнення свого максимуму на ділянці насичення ефективної частоти розрядних імпульсів впливають електрофізичні особливості поведінки міжконтактного опору гранул та їх схильності до утворення у середовищі ланцюжків наскрізної провідності.

3. Питомі енергозатрати Q у процесі ЕІД алюмінієвих гранул (5 кВт·год/кг) виявились нижче ніж для титанових (8,3 кВт·год/кг), водночас отримана крива потужності для титанового навантаження характеризується відсутністю ділянки її насичення через настання у ТГІ режиму короткого замикання. У разі збільшення зовнішнього діаметру реакційної камери та відповідно міжконтактних проміжків по довжині МЕР за умов певної кількості шарів ОБШМГ максимум потужності також зростає, що відповідно корелює з показником Q у бік його зниження.

4. З'ясовано, що ефективна частота розрядних імпульсів ЕІД залежить від струму омичних контактів, без-

посереднє протікання якого до початку основного розряду спричиняє розігрівання контактних поверхонь гранул, що впливає на іонізаційні процеси розвитку електронних лавин та формування плазмових каналів.

5. Встановлено, що основною причиною зниження середньої потужності зі зростанням насипного об'єму металевих гранул на ділянці насичення кривої ефективної частоти розрядних імпульсів, є зниження його як початкового, так і еквівалентного опору, що викликано збільшенням площі поверхні дотику гранул з електродами реакційної камери, тому перехідний процес у розрядному контурі стає більш розгалуженим.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Monastyrsky G. Nanoparticles formation mechanisms through the spark erosion of alloys in cryogenic liquids. *Nanoscale Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 1, art. no. 503. doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1212-9>.
2. Jin C.H., Si P.Z., Xiao X.F., Feng H., Wu Q., Ge H.L., Zhong M. Structure and magnetic properties of Cr/Cr₂O₃/CrO₂ microspheres prepared by spark erosion and oxidation under high pressure of oxygen. *Materials Letters*, 2013, vol. 92, pp. 213-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.10.126>.
3. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S., Adamchuk Y.O., Vinnychenko I.L., Vyshnevskiy O.A. Synthesis of Tungsten Carbides Submicron Powders by High-Frequency Electrospark Treatment Method. *Springer Proceedings in Physics*, 2024, vol. 312 SPPHY, pp. 385-395. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67527-0_27.
4. Шидловська Н.А., Захарченко С.М., Черкаський О.П. Фізичні передумови побудови математичних моделей електричного опору плазмоерозійних навантажень. *Технічна електродинаміка*, 2017, № 2, С. 5-12. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>.
5. Шидловська Н.А., Захарченко С.М. Дискретна нелінійно-імовірнісна модель еквівалентного електричного опору шару металевих гранул. *Технічна електродинаміка*, 2021, № 2, С. 3-12. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.003>.
6. Щерб А.А., Супруновська Н.І. Циклічні перехідні процеси в ланцюгах електророзрядних установок з урахуванням впливу швидкості наростання розрядних струмів та паузи між ними на опір навантаження. *Технічна електродинаміка*, 2018, № 2, С. 3-10. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.003>.
7. Щерб А.А., Супруновська Н.І., Івашченко Д.С. Моделювання нелінійного опору електроіскрового навантаження для синтезу кола розряду конденсатора за часовими параметрами. *Технічна електродинаміка*, 2014, № 3, С. 12-18.
8. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Zakharchenko M.F., Kulida M.A., Zakusilo S.A., Yakovenko R.A. Distribution of volumes of plasma channels components between metal granules in working liquids. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 1, pp. 73-85. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.1.10>.
9. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Zakharchenko M.F., Kulida M.A., Zakusilo S.A. Spectral and optic-metric methods of monitoring parameters of plasma channels caused by discharge currents between metals granules in working liquids. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 6, pp. 72-83. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.10>.
10. Petrov O., Petrichenko S., Yushchishina A., Mitryasova O., Pohrebennyk V. Electrospark Method in Galvanic Wastewater Treatment for Heavy Metal Removal. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 15, art. no. 5148. doi: <https://doi.org/10.3390/app10155148>.
11. Khrysto O.I. Current-voltage characteristics of single-stage semiconductor magnetic pulse generators with a distinctive structure of the conversion link in the input circuit. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 6, pp. 41-47. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.6.07>.
12. Syzonenko O.M., Tashev P., Torpakov A.S., Lypian Ye.V., Prysytash M.S., Kandeва M., Dyakova V. Influence of the High-Voltage Discharge Treatment of Powders on the Properties of Metal Matrix

Composites of the Ti-TiC System. *Materials Science*, 2022, vol. 58, pp. 165-174. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00645-3>.

13. Khrysto O. Energy transfer processes in high-voltage circuits based on magnetic pulse compression. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 3-10. doi: <https://doi.org/10.15546/aei-2020-0013>.

14. Khrysto O.I. Energy characteristics for nanosecond current interrupter of semiconductor-magnetic pulse generator's terminal stage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 59-65. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.09>.

15. Petrichenko S., Malyshevskaya A., Ivanov A., Mitryasova O., Salamon I. Improving the Efficiency of Water Purification from Heavy Metals using the Electric Spark Method. *Journal of Ecological Engineering*, 2024, vol. 25, no. 8, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.12911/22998993/189230>.

16. 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).

17. Захарченко С.Н. Моделирование зависимости электрического сопротивления гранулированных токопроводящих сред от протекающего в них импульсного тока. *Технічна електродинаміка*, 2012, № 5, С. 17-27. (Rus).

18. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the formation of multi-channel pulse currents and fast-migrating electric sparks in the layer of current-conducting granules of electric-discharge installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2022, no. 2, pp. 3-11. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.02.003>.

19. 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, no. 4, pp. 863-873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.01.003>.

20. Захарченко С.М., Шидловська Н.А., Перекоз А.О., Захарченко М.Ф. Енергоєфективність електрофізичних методів диспергування та електрохімічного розчинення ряду металів. *Металодізна та новітні технології*, 2021, Т. 43, № 4, С. 465-487. doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.04.0465>.

21. Gulbinowicz Z., Goroch O., Skoczylas P. Mathematical Modeling of Material Erosion During the Electrical Discharge. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 27-33. doi: <https://doi.org/10.12913/22998624/114959>.

REFERENCES

1. Monastyrsky G. Nanoparticles formation mechanisms through the spark erosion of alloys in cryogenic liquids. *Nanoscale Research Letters*, 2015, vol. 10, no. 1, art. no. 503. doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-1212-9>.
2. Jin C.H., Si P.Z., Xiao X.F., Feng H., Wu Q., Ge H.L., Zhong M. Structure and magnetic properties of Cr/Cr₂O₃/CrO₂ microspheres prepared by spark erosion and oxidation under high pressure of oxygen. *Materials Letters*, 2013, vol. 92, pp. 213-215. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.10.126>.
3. Vinnychenko D.V., Nazarova N.S., Adamchuk Y.O., Vinnychenko I.L., Vyshnevskiy O.A. Synthesis of Tungsten Carbides Submicron Powders by High-Frequency Electrospark Treatment Method. *Springer Proceedings in Physics*, 2024, vol. 312 SPPHY, pp. 385-395. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67527-0_27.
4. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Cherkaskiy O.P. Physical prerequisites of construction of mathematical models of electric resistance of plasma-erosive loads. *Technical Electrodynamics*, 2017, no. 2, pp. 5-12. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.005>.
5. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M. Discrete nonlinear-probabilistic model of the equivalent electrical resistance of a layer of metal granules. *Technical Electrodynamics*, 2021, no. 2, pp. 3-12. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.003>.
6. 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. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 2, pp. 3-10. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.003>.
7. 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. *Technical Electrodynamics*, 2014, no. 3, pp. 12-18. (Ukr).

8. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Zakharchenko M.F., Kulida M.A., Zakusilo S.A., Yakovenko R.A. Distribution of volumes of plasma channels components between metal granules in working liquids. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 1, pp. 73-85. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.1.10>.
9. Shydlovska N.A., Zakharchenko S.M., Zakharchenko M.F., Kulida M.A., Zakusilo S.A. Spectral and optic-metric methods of monitoring parameters of plasma channels caused by discharge currents between metals granules in working liquids. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2024, no. 6, pp. 72-83. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.6.10>.
10. Petrov O., Petrichenko S., Yushchishina A., Mitryasova O., Pohrebennyk V. Electrosark Method in Galvanic Wastewater Treatment for Heavy Metal Removal. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 15, art. no. 5148. doi: <https://doi.org/10.3390/app10155148>.
11. Khrysto O.I. Current-voltage characteristics of single-stage semiconductor magnetic pulse generators with a distinctive structure of the conversion link in the input circuit. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 6, pp. 41-47. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.6.07>.
12. Syzonenko O.M., Tashev P., Torpakov A.S., Lypian Ye.V., Pryshtash M.S., Kandeva M., Dyakova V. Influence of the High-Voltage Discharge Treatment of Powders on the Properties of Metal Matrix Composites of the Ti-TiC System. *Materials Science*, 2022, vol. 58, pp. 165-174. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00645-3>.
13. Khrysto O. Energy transfer processes in high-voltage circuits based on magnetic pulse compression. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 3-10. doi: <https://doi.org/10.15546/aeci-2020-0013>.
14. Khrysto O.I. Energy characteristics for nanosecond current interrupter of semiconductor-magnetic pulse generator's terminal stage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 59-65. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.09>.
15. Petrichenko S., Malyshevskaya A., Ivanov A., Mitryasova O., Salamon I. Improving the Efficiency of Water Purification from Heavy Metals using the Electric Spark Method. *Journal of Ecological Engineering*, 2024, vol. 25, no. 8, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.12911/22998993/189230>.
16. 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).
17. Zakharchenko S.N. Modelling of dependence of electrical resistance of granulated current-carrying mediums from a pulse current proceeding in them. *Technical Electrodynamic*, 2012, no. 5, pp. 17-27. (Ukr).
18. Shcherba A.A., Suprunovska N.I., Shcherba M.A. Features of the formation of multi-channel pulse currents and fast-migrating electric sparks in the layer of current-conducting granules of electric-discharge installations. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2022, no. 2, pp. 3-11. doi: <https://doi.org/10.15407/teched2022.02.003>.
19. 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, no. 4, pp. 863-873. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.01.003>.
20. Zakharchenko S.M., Shydlovska N.A., Perekos A.O., Zakharchenko M.F. Power Efficiency of Electrophysical Methods of Dispersion and Electrochemical Dissolution of Several Metals. *Metalofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2021, vol. 43, no. 4, pp. 465-487. (Ukr). doi: <https://doi.org/10.15407/mfint.43.04.0465>.
21. Gulbinowicz Z., Goroch O., Skoczylas P. Mathematical Modeling of Material Erosion During the Electrical Discharge. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 27-33. doi: <https://doi.org/10.12913/22998624/114959>.

How to cite this article:

Khrysto O.I. Analysis of energy characteristics of a transistor pulse generator in the process of electric spark dispersion of current-conductive granular media. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2025, no. 5, pp. 70-79. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.5.10>

Надійшла (Received) 24.03.2025
 Прийнята (Accepted) 01.06.2025
 Опублікована (Published) 02.09.2025

Христо Олександр Іванович¹, к.т.н., с.н.с.,

¹ Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, 54018, Миколаїв, пр. Богоявленський, 43-А, e-mail: alexander.khristo@gmail.com

O.I. Khrysto¹, PhD, Senior Researcher,

¹ Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, 43-A, Bogoyavlenskij Avenue, Mykolayiv, 54018, Ukraine.

Analysis of energy characteristics of a transistor pulse generator in the process of electric spark dispersion of current-conductive granular media.

Introduction. Studies of electrophysical and technological aspects of electric discharge in reaction chambers with granular metal loading to obtain its highly dispersed states have been conducted for many decades, however, the power sources of electric spark dispersion installations today remain mainly classical in terms of the method of generating current pulses on the electric spark load. The main **problem** of using powerful current pulse generators and reaction chambers with a plane-parallel electrode system is to imitate the principle of the thermo-explosive mechanism of developing an electrical breakdown of dense intergranular gaps, which leads to deterioration of the dispersion of the eroded material, and the use of smaller energy ranges (<1 J) in such installations is complicated by the electrophysical limitations of the existence of plasma channels and the loss of energy efficiency of the electric spark treatment process. **Goal.** Research on the energy efficiency of the electric spark dispersion process of heterogeneous conductive granular media in a reaction chamber with a cylindrical electrode system, provided that it is powered by a transistor pulse generator. **Results.** Specific energy consumption in the process of electric spark dispersion of aluminum and titanium granules was determined, which correlate with the average power consumption indicators of processing depending on their bulk volume within a certain configuration of the electrode system. **Scientific novelty.** The flow of current through ohmic contacts until the formation of the main discharge in the intergranular volumes of the reaction chamber causes a voltage drop across the inductance of the discharge circuit, which accordingly reduces the amplitude of the applied voltage to the interelectrode gap, due to which the maximum of the average power consumption characteristic of the transistor pulse generator, which occurs before the beginning of the saturation section of the effective frequency curve of the discharge pulses, corresponds to the most consistent mode of energy input into the electric spark load. The **practical value** of the considered model of the electric discharge installation proves the feasibility of its use for the tasks of electric spark treatment of conductive granular media. References 21, tables 2, figures 7.

Key words: energy characteristics, electric spark dispersion, transistor pulse generator, cylindrical electrode system, layer of metal granules, ohmic contact current.