

УДК 539

А.В. Євченко, студ.  
Житомирський інженерно технологічний інститут  
О.В. Котик, аспір.  
А.О. Новіков, д.т.н., проф.  
Вінницький державний технічний університет

### СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ГАЗОРОЗРЯДНОЮ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЮ УСТАНОВКОЮ

*Робота присвячена аналізу та обґрунтуванню способу керування газорозрядною електронно-променевою установкою на основі джерела високовольтного тліючого розряду. Ідеєю розробки є метод керування, при якому відокремлюють та змінюють параметри змінної складової електричного поля та струму в газорозрядній електронній гарматі. Основним результатом запропонованого способу керування є підвищення ефективності керування та стійкості роботи установки в процесі керування.*

В останні роки широкий розвиток отримали еліонна техніка та технологія – комплекс засобів, що забезпечують отримання та ефективне використання електронних та іонних потоків для проведення технологічних операцій. Найбільш широко застосовуються процеси, в основі яких лежить використання енергії прискорених електронних пучків, що генеруються джерелами електронів (ДЕЛ). При електронній обробці речовин змінюється їх агрегатний стан, макро- та мікроструктури, хімічний склад. Основними перевагами електронної технології є можливість концентрації великої потужності, отримання граничних температур, висока точність забезпечення необхідних температурних режимів, можливість швидкого нагріву матеріалу, інтенсифікація технологічного процесу, використання вакууму та інших контролюємих атмосфер. При високій якості обробки забезпечується зменшення витрат енергії, відносна простота здійснення процесу та можливість його повної автоматизації. Електронно-променева обробка дозволила вирішити ряд металургічних, технологічних та конструктивних проблем в сучасній промисловості, визначаючи технічний прогрес в таких важливих областях, як металургія, машинобудування, приладобудування, електронна промисловість.

В науці та техніці сформувався загальний науковий напрямок – розробка та дослідження методів та засобів отримання та використання керованих потоків електронів для виконання технологічних функцій [1]. Його аналіз показує, що потоки заряджених частинок в технології можуть використовуватись більш широко, але при цьому актуальною проблемою лишається розробка ефективних та надійних технологічних ДЕЛ з удосконаленням методів і способів керування їх параметрами для роботи при середньому та низькому вакуумі, що формують пучки електронів складної форми та необхідних енергетичних параметрів. Створення таких ДЕЛ необхідно, перш за все, для використання при обробці конструктивних матеріалів, при невисокому вакуумі. При цьому для діапазону прискорюючих напруг, що використовується в технологічних електронних гарматах, рівного  $10^3 \div 10^5$  В, коли немає значного поглинання енергії та розсіювання пучка, допустимий тиск газу в робочій камері може бути  $10^{-2} \div 10^2$  Па. Крім того, є великий клас технологічних операцій та пристроїв (іонне осадження, плазмова та радіаційна хімія, лазерна та прискорююча техніка), де інтенсивні електронні пучки також необхідно використовувати при середньому та низькому вакуумі.

Можливим та ефективним рішенням цієї проблеми є розробка способів та пристроїв для отримання інтенсивних керованих пучків електронів в складних електродних системах з високовольтним тліючим розрядом [4]. Джерела електронів високовольтного тліючого розряду (ДЕЛ ВТР) мають широкий діапазон значень струмів, прискорюючих напруг, робочих тисків різноманітних технологічних газів, порівняно просту конструкцію електродів газодинамічну вакуумну систему, більш широкий діапазон оптимально согласованих робочого тиску і роду газу в гарматі та технологічній камері. Низька температура катода дозволяє використовувати широкий клас дешевих емісійних матеріалів, забезпечує досить великий строк служби катодів та стабільність їх роботи при самоочищенні, дозволяє конструювати катоди різноманітної форми, розмірів, що відповідають необхідним енергетичним та геометричним параметрам електронних пучків. Застосування електронно-променевої техніки в звичайних галузях

машинобудування, технології, різних електрофізичних установках відкриває широкі перспективи для використання ДЕЛ ВТР, особливо при формуванні складних та широких електронних потоків в умовах середнього вакууму.

На даний час лишається проблемою надійність та стабільність роботи ДЕЛ ВТР, керування їх основними параметрами. Основними найбільш ефективними способами керування такими системами є:

- газодинамічне керування вихідними параметрами газорозрядної електронно-променевої установки (ГРЕПУ) [1] шляхом зміни тиску газу в газорозрядній гарматі;
- керування за допомогою допоміжного розряду при введенні керуючих електродів від'ємної або позитивної полярності;
- керування струмом променя за рахунок зміни різниці потенціалів (електричного поля) як за величиною, так і за полярністю поза межами області прискорення електронного променя між анодом та колектором.

Недоліками цих способів є мала ефективність та нестійкість роботи в процесі керування. Це пов'язано з тим, що керування здійснюють по постійному струму (напрузі) і тільки в частині простору розповсюдження електронного пучка між анодом та колектором. При цьому не враховуються динамічні властивості газорозрядної електронної гармати (ГРЕГ) і всього електронного променя, який розповсюджується в плазмі від катоду до колектора. Це зменшує ефективність керування іонізаційними процесами та стійкість керування параметрами гармати.

Газорозрядна електронна гармата високовольтного тліючого розряду (ВТР) має ділянки вольтамперної характеристики, на яких її динамічний опір від'ємний. Ці ділянки утворюються при мікропробоях, інших нестабільностях, коли струм в міжелектродному проміжку зростає, а спад напруги між ними зменшується.

Як відомо, через нестійкість горіння високовольтного тліючого розряду в електронній гарматі та технологічній камері виникають електромагнітні коливання, які мають широкий спектр частот [1]. В газорозрядних електронних гарматах розвиваються ВЧ-коливання в діапазоні 5÷40 МГц, потужність яких складає ~ 1 % від потужності електронного пучка і суттєво впливає на розповсюдження балансу потужності та заряджених частинок в електронній гарматі, тобто, в кінцевому рахунку, на її вихідні параметри. В ГРЕГ до 1÷5 % її потужності перетворюються в потужність електромагнітних коливань. Ці коливання на 50÷80 % забезпечують баланс заряджених частинок в анодній плазмі, тому буде ефективним керування вихідними параметрами гармати шляхом дії на параметри змінної складової струму. Енергетична ефективність та стабільність ГРЕГ підвищується шляхом використання резонансних частот та керування амплітудно-частотними характеристиками ВЧ-коливань в гарматі [2]. Відомо [5], що на оптимальній частоті (~ 30 МГц) необхідне електричне поле пробою газу може зменшуватись в 2÷3 рази. Динамічні характеристики гармат ВТР досліджені в роботі [3], в якій показано, що вони мають від'ємний опір. Дослідження ролі коливань в гарматі ВТР показують суттєвий вплив на вихідні параметри гармати. Тому при даному способі керування здійснюється шляхом виділення цих ВЧ-коливань в окреме коло та дією на них за допомогою радіотехнічних засобів.

Одним зі шляхів вирішення цієї задачі може бути метод керування, при якому виділяють та змінюють параметри змінної складової електричного поля та струму в газорозрядній електронній гарматі.

Спосіб керування ГРЕПУ здійснюється шляхом включення ГРЕГ за схемою діодного генератора, що дозволяє виділити змінну складову струму або поля, а потім відбувається керування амплітудою, частотою та фазою коливань його струму шляхом механічного, електричного або магнітного підстроювання параметрів зовнішнього кола діодного генератора.

Даний спосіб характеризується такими операціями та прийомами, які використовуються для досягнення мети підвищення надійності та керованості роботи газорозрядних електронно-променевих установок:

1. Виділяють змінну складову струму газорозрядної електронної гармати.
2. Змінюють (перетворюють) амплітуду, фазу та частоту цієї змінної складової струму гармати.
3. Зміни проводять у відповідності до необхідної функції керування вихідними параметрами газорозрядної електронної гармати.

Зміна параметрів змінної складової поля або струму дозволяє керувати іонізаційними

процесами в газорозрядній гарматі, тому що вони залежать від таких взаємопов'язаних параметрів, як амплітуда, частота та фаза електромагнітних коливань, що розвиваються в гарматі. Таким чином, використання змінної складової поля або струму дозволяє підвищити ефективність керування.

Підвищення стабільності роботи гармати забезпечується тим, що зміною параметрів змінної складової поля або струму досягається керування динамічним опором гармати, що дозволяє стабілізувати роботу.

На даний час діодні генератори широко використовуються в радіотехніці. При цьому зазвичай використовують спеціальні напівпровідникові прилади (діоди). Діод розглядається як двополюсник та включається у зовнішнє електромагнітне коло. Аналогом газорозрядної гармати може служити лавино-прольотний діод, що має, як і гармата, S-подібну вольтамперну характеристику. Тому при наявності від'ємного динамічного опору газорозрядний діод ВТР, тобто газорозрядна гармата, буде аналогічний генераторним діодам та може бути використаний як джерело незагасаючих електромагнітних коливань високої частоти.

З іншого боку, наявність коливань в колі діода суттєво впливає на статичні характеристики самого газорозрядного діода ВТР, що пов'язано із залежністю ефективності іонізації газу від частоти та інтенсивності високочастотних коливань.

Ефективність іонізації змішаним полем визначається тиском газу, частотою зіткнень електронів з молекулами газу, амплітудою та частотою прикладеного електричного поля, розмірами розрядного проміжку. Для розрядів низького тиску газу є резонансна частота, на якій ефективність іонізації найбільша.

Таким чином, при включенні газорозрядної електронної гармати та проведенні технологічної операції в її колі виникають коливання струму та електричного поля, які кількісно можна оцінити через усереднену амплітуду коливань ( $A_0$ ), усереднену частоту коливань ( $f_0$ ) та усереднену фазу коливань ( $\varphi_0$ ).

Блок-схема, яка пояснює даний спосіб керування, представлена на рис. 1. На ньому газорозрядна електронна гармата 1, яка з'єднана з технологічною камерою 2, утворюють газорозрядну електронно-променеву установку. До неї приєднані високовольтне джерело живлення 3, фільтр захисту джерела живлення 4, пристрій зв'язку 5, резонатор 6, трансформатор опору 7, пристрій зв'язку з навантаженням 8, навантаження 9.

Сам спосіб керування газорозрядною електронно-променевою установкою полягає в наступному.

В газорозрядній електронній гарматі 1 та технологічній камері 2 за допомогою вакуумних насосів отримують тиск газу в діапазоні  $10^{-1} \div 10$  Па. Від високовольтного джерела живлення постійного струму 3 через фільтр його захисту 4 до газорозрядної гармати 1 підводять різницю потенціалів 5-30 кВ. В гарматі 1 запалюється високовольтний тліючий розряд, струм якого протікає від позитивного полюса джерела живлення 3 до його від'ємного полюса через фільтр 4, технологічну камеру 2, газорозрядну гармату 1. Робочий струм регулюють зміною тиску газу в гарматі. При цьому газорозрядна електронна гармата 1 генерує електронний промінь, який утворюється на катоді внаслідок бомбардування його позитивними іонами плазми, що утворюються при іонізації газу електронами в самій гарматі 1 та технологічній камері 2. Промінь виводиться в технологічну камеру та використовується для обробки матеріалів.

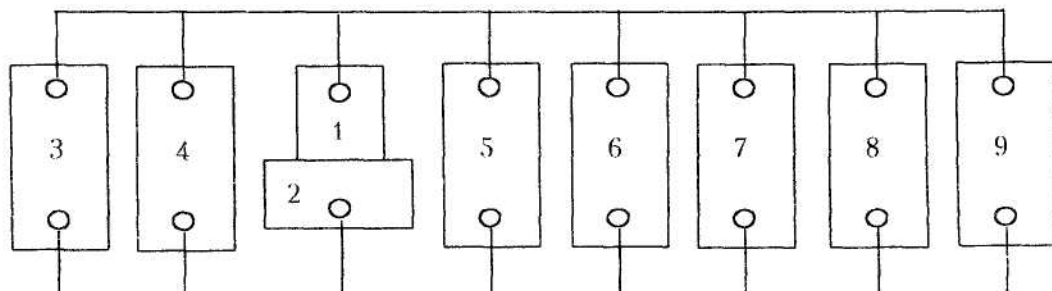


Рис. 1. Блок-схема способу керування газорозрядною електронно-променевою установкою: 1 – газорозрядна електронна гармата; 2 – технологічна камера; 3 – високовольтне джерело живлення; 4 – фільтр захисту джерела живлення; 5 – пристрій зв'язку; 6 – резонатор; 7 – трансформатор опору; 8 – пристрій зв'язку з навантаженням; 9 – навантаження

Для керування вихідними параметрами газорозрядної електронної гармати шляхом відокремлення і зміни параметрів змінної складової електричного поля та її струму користуються схемою діодного генератора, який утворюється з пристроєм зв'язку, резонатора, трансформатора опору, пристроєм зв'язку з навантаженням, опором навантаження.

В якості пристрою зв'язку можна використовувати відомі принципи гальванічного, ємнісного або індуктивного зв'язків.

В якості резонатора використовують паралельні або послідовні коливальні контури, які містять  $L$ ,  $C$ ,  $R$  зосереджені або розподілені елементи. Вони можуть бути перестроюваними, вузькосмуговими, широкосмуговими, відрізнятися за величиною добротності тощо.

Трансформатор опору служить для узгодження внутрішнього опору газорозрядної гармати з опором навантаження. В якості трансформатора опору використовують як пасивні, так і активні елементи електричних кіл. Часто ці функції виконує пристрій зв'язку з навантаженням, в якості якого використовують відрізки ліній передачі або їх еквіваленти на елементах із зосередженими параметрами ( $L$ ,  $C$ ,  $R$ ).

При навантаженні відокремлюється змінна складова струму в колі газорозрядної електронної гармати. Навантаження може бути омичним, ємнісним, індуктивним, комплексним.

Зміна параметрів змінної складової  $A_0$ ,  $f_0$ ,  $\varphi_0$  електричного поля та струму викликають зміну параметрів елементів керування, по яким цей струм протікає. При цьому наявність цих елементів дозволяє керувати режимом роботи генератора, від якого залежать вихідні параметри та стійкість роботи газорозрядної електронно-променевої установки (ГРЕПУ). Оптимальний діапазон зміни параметрів змінної складової визначається умовами  $0,1 \leq A/A_0 \leq 5$ ;  $0,1 \leq f/f_0 \leq 5$ ;  $-1 \leq \varphi/\varphi_0 \leq 1$ . Нижня границя обмежена зменшенням чутливості керування, а верхня – граничним значенням добротності та перестроюваності ГРЕПУ.

Вплив електромагнітних коливань на параметри газорозрядної електронної гармати буде проявлятися внаслідок того, що, змінюючи, наприклад, параметри резонатора, ми змінюємо амплітуду змінної складової струму ГРЕГ, частоту коливань, їх фазу. А це впливає на іонізаційні процеси та еквівалентний динамічний опір ГРЕПУ. Змінюючи, наприклад, опір навантаження, можна компенсувати від'ємний динамічний опір системи та зірвати коливання на визначеній частоті, а змінюючи частоту за допомогою резонатора, можна отримати резонансний ВЧ-розряд.

Таким чином, якщо є додаткове коло генератора на газорозрядній електронній гарматі, можна ефективно керувати параметрами газорозрядної електронно-променевої установки.

Конкретна реалізація цього способу різноманітна. При цьому в конкретних випадках можуть використовуватися для керування ГРЕПУ лише окремі елементи кола генератора (резонатори, погоджувальні пристрої, елементи зворотнього зв'язку, навантаження, фільтри тощо). Елементи можуть бути як із зосередженими параметрами, так і з розподіленими.

Генератор з ГРЕГ може працювати в режимах автогенерації, підсилення та синхронізації автоколивань зовнішнім сигналом, стабілізації та керування частотою, імпульсної модуляції тощо.

Перестроювання частоти змінної складової струму генератора на ГРЕГ може бути механічним, електричним та магнітним. Стабілізація частоти здійснюється високочастотними резонаторами, зовнішніми високостабільними джерелами коливань та іншими засобами.

Для керування амплітудою змінного струму використовують різноманітні навантаження, перш за все, резистивні. При цьому враховують, що генератор на ГРЕГ віддає навантаженню максимальну потужність при рівності внутрішнього опору генератора та опору навантаження.

Для перестроювання частоти, її стабілізації використовують змінні електричні ємності, наприклад, варактори, зв'язані контури, різноманітні електричні фільтри. Фільтр забезпечує заглушення одних частотних складових складного сигналу та добру передачу інших. Він характеризується затуханням, що вноситься в тракт. Смуга частот з малим затуханням – смуга пропускання, з великим – смуга загорожі.

Для керування фазою коливань використовують ті ж перестроювані елементи. Однак слід відмітити, що через шумовий характер змінної складової струму фазове керування менш ефективне, ніж керування амплітудою та частотою.

Даний спосіб може бути реалізовано широким набором електронних засобів, наприклад,

крім описаних вище, шляхом використання сигналів від зовнішніх джерел синхронізуючих або модулюючих змінну складову струму ГРЕГ, зміною режиму живлення гармати постійним струмом та ін. Схемна та конструктивна реалізації способу також дуже різноманітні.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Л.П. Шаптурин.* Плазменные процессы в технологических электронных пушках. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 256 с.
2. *Лубинец Г.Я., Мельник В.И., Новиков А.А.* Электрическое управление параметрами газоразрядного источника электронов с прианодной плазмой // *Электронная обработка материалов.* – 1977. – № 1. – С. 78.
3. *Магас Т.Е.* Частотная характеристика и схема замещения электронной пушки ВТР // *Тез. докл. VIII Всес. симпозиума по сильноточной электронике, Ч. I.* Свердловск. – 1990. – С. 51–54.
4. *Новиков А.А.* Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 96 с.
5. *Френсис Г.* Ионизационные явления в газах. – М.: Атомиздат, 1964. – 323 с.

ЄВЕНКО Андрій Васильович – студент 4-го курсу Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- розробка потужних прискорювачів та сильноточових високовольтних комутаторів,
- радіолокація;
- фізика та техніка прискорювачів;
- системи радіонавігації.

КОТИК Олександр Валерійович – магістр електроніки, аспірант Вінницького державного технічного університету, молодший науковий співробітник кафедри мікроелектроніки, оргтехніки та зв'язку Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

- пучково-плазмові процеси в електронно-променевій апаратурі промислового застосування;
- плазмова електроніка;
- розробка електронно-променевої апаратури для технології;
- нанесення різноманітних функціональних покриттів;
- генерування НВЧ-коливальних, прискорювальних техніки;
- системи керування технологічними джерелами електронів.

НОВИКОВ Анатолій Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри мікроелектроніки, оргтехніки та зв'язку Вінницького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

- вакуумна та газорозрядна електроніка;
- електронно-променева технологія та технологічні електронні гармати;
- прилади та обладнання для отримання та використання плазми;
- джерела електронів високовольтного тліючого розряду;
- дослідження кульової блискавки.