

А.Д. Єгоров, В.А. Єгоров, С.А. Єгоров, І.Є. Сінельніков

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

E-mail: yegorov@ire.kharkov.ua

Дуговий генератор плазми атомно-емісійного аналізатора з цифровим керуванням параметрами розряду

Предмет і мета роботи. Предметом роботи є атомно-емісійний спектральний аналіз (АЕСА) речовин з використанням найдоступніших та широко застосовуваних у лабораторній і виробничій практиці дугових та іскрових джерел спектра. Метою роботи є вдосконалення принципів розв'язання практичних задач побудови джерел живлення дугового та іскрового розряду з наперед заданими властивостями і дослідження їх параметрів.

Методи і методологія роботи. В роботі використано відомі способи отримання іскрових і дугових розрядів. Декілька конструкцій вузлів живлення розрядного струму і пробою розрядного проміжку, що запропоновані, промодельовані з використанням програми комп'ютерного схемотехнічного моделювання, а далі випробувані на діючих макетах. Випробування розробленого генератора виконано шляхом його порівняння з промисловим генератором методом статистичного аналізу результатів спектральних вимірювань.

Результати роботи. Розроблено і виготовлено дуговий генератор плазми ЦУГ-2 з мікропроцесорним керуванням. Виконано розробку вузла формування розрядного струму, що функціонує за принципом цифро-аналогового перетворювача з складанням струмів. Розроблено блок пробою розрядного проміжку на напівпровідниковій елементній базі без використання газових розрядників. Створений генератор забезпечує формування імпульсів пробою розрядного проміжку амплітудою до 12 кВ та дугових імпульсів розрядного струму в діапазоні 1...47 А. На основні імпульси струму можуть додатково накладатися допоміжні імпульси з амплітудою до 150 А. Виконано порівняльні випробування розробленого генератора з серійним генератором УГЕ-4.

Висновок. За результатами вимірювань встановлено, що середньоквадратичне відхилення даних фотометрування плазмових утворень, одержаних за допомогою розробленого генератора, в середньому в три рази менше, ніж під час використання промислового генератора УГЕ-4. Іл. 11. Табл. 1. Бібліогр.: 20 назв.

Ключові слова: атомно-емісійний спектральний аналіз, дугове джерело спектра, іскрове джерело спектра, джерело струму.

Відкритий понад 100 років тому атомно-емісійний спектральний аналіз (АЕСА) речовини залишається одним з найбільш затребуваних методів елементного аналізу завдяки високій чутливості, багатокомпонентності та експресності. На цей час більше 80 % експрес-аналізів у світі виконується за допомогою АЕСА. Цей метод є основним при вхідному і вихідному контролі сировини та продукції в таких галузях, як чорна і кольорова металургія, гірничодобувна, збагачувальна і переробна промисловість, виробництво особливо чистих матеріалів, екологічний контроль у харчовій промисловості, пере-

робка відходів ядерної енергетики та ін. [1]. Для проведення АЕСА речовини необхідно виконати такий ланцюжок послідовних операцій: відібрати необхідну кількість речовини, розігріти її до переходу в газоподібний стан, здійснити спектральний аналіз оптичного випромінювання одержаного плазмового утворення і виміряти аналітичні параметри емісійного спектра.

Точність АЕСА залежить від характеристик блоків, що входять до складу спектрометра, але, в першу чергу, від параметрів джерела збудження спектра. У джерелі збудження спектра речовина, що досліджується, переходить у га-

зоподібний стан, атомізується та іонізується – переводиться в стан плазми. За рахунок зовнішніх джерел енергії атоми та іони в плазмі переходять у збуджений стан, випромінюючи лінійчатий спектр, характерний для кожного з елементів. При цьому джерела збудження мають забезпечувати отримання великих і, за можливістю, постійних інтенсивностей випромінювання спектральних ліній досліджуваних елементів [2].

Як джерело спектра у практиці АЕСА застосовують полум'я, електричні дуги постійного та змінного струму, низько- і високовольтну конденсовану іскру, низьковольтний імпульсний розряд, тліючий газовий розряд та ін. За останні 10–15 років поширення набули різні види високочастотних розрядів: високочастотна індуктивнозв'язана плазма в середовищі інертних газів при атмосферному тиску, надвисокочастотний розряд та ін. [3].

Незважаючи на появу великої кількості приладів з новими методами збудження спектра, іскрові і дугові джерела не втратили свого значення і залишаються одними з найпоширеніших у практиці АЕСА [4]. Це пояснюється невисокою вартістю – як початковою, так і подальшого обслуговування, простотою, високою чутливістю та прийнятною відтворюваністю результатів аналізу. Дугові джерела збудження спектра, як правило, використовуються для визначення низьких концентрацій речовини в зразках завдяки високій чутливості та здатності до збудження, в основному, таких спектральних ліній, які мають низькі потенціали збудження. Під час використання високовольтної іскри проявляються лінії з високим потенціалом збудження, що характеризуються більш низькою чутливістю. Проте ці лінії забезпечують кращу точність і широкий діапазон лінійності градувальних залежностей [2]. У багатьох випадках необхідно використовувати обидва джерела для здійснення аналізу в усьому діапазоні концентрацій.

В ІРЕ НАН України розробленням і впровадженням апаратури АЕСА протягом кількох років займається група прикладної спектроскопії. У результаті були розроблені та впроваджені конструкції спектральних камер реєстрації спектра, оптичних блоків [5–7], дугових та іскрових джерел спектра. Опису та порівняль-

ним дослідженням деяких розробок цього напрямку присвячена ця робота.

Слід зазначити, що іскрові та дугові генератори як окремі закінчені пристрої виробляють компанії Росії [8–10]. Такі джерела застосовують для модернізації застарілого спектроаналітичного обладнання та комплектації нового. Великі західні приладобудівні компанії, як правило, випускають спектрометричні прилади, що складаються з джерела збудження спектра, оптики, системи реєстрації спектра, з програмним і методичним забезпеченням [11].

1. Принципи побудови генератора. На цей час існує декілька стандартних схем побудови іскрових і дугових джерел збудження спектра. Схеми з високовольтною (10...15 кВ) і низьковольтною (400...600 В) іскрою будуються за принципом розряду конденсатора через розрядний проміжок. Розряд конденсатора здійснюється через набір резисторів та індуктивностей (*RCL*-розряд). При цьому за рахунок зміни параметрів розрядного контура є можливість збудження як іскрових ліній з низьким потенціалом збудження, так і йонних ліній з високим потенціалом іонізації. До недоліків іскрових генераторів слід віднести те, що комутація в розрядному контурі здійснюється або перемичками, або електромагнітними реле. Це ускладнює оперативне керування параметрами розряду і вимагає періодичного обслуговування [2–4].

Дугові джерела формують розрядний струм як за допомогою баластних резисторів великої потужності («класичні» генератори), так і активних імпульсних джерел струму. Останні будуються з використанням силової імпульсної напівпровідникової електроніки та цифрових мікропроцесорних систем керування та контролю. Це істотно розширює можливості керування параметрами розряду, підвищує стабільність і відтворюваність результатів аналізу [8–10]. Основним обмеженням дугових джерел є те, що вони збуджують спектральні лінії з низьким рівнем збудження. Розширення цього діапазону вимагає збільшення швидкості наростання струму та імпульсної потужності в розряді, що наштовхується на обмеження в режимах роботи потужних напівпровідникових приладів.

У процесі досліджень автори розробили і випробували кілька конструкцій генераторів іс-

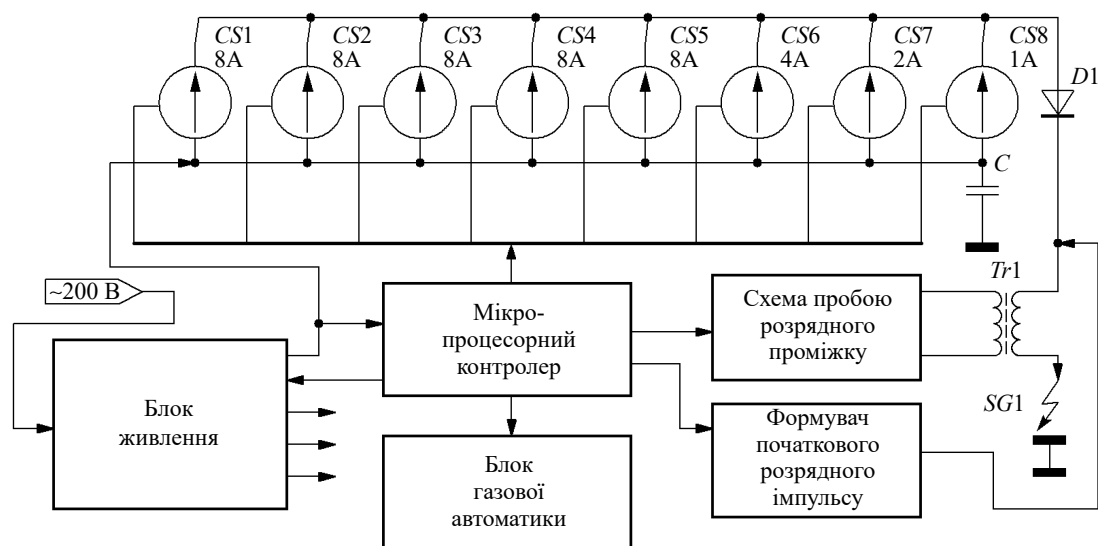


Рис. 1. Структурна схема генератора ЦУГ-2 (CS1...CS8 – стабілізатори струму, SG1 – розрядний проміжок)

кровою та дуговою розрядів як для лабораторних досліджень, так і для впровадження їх у виробництво. Спочатку проектування мало на меті створення генератора низьковольтної іскри, але з часом було вирішено застосувати принцип безпосереднього формування розрядного струму з використанням потужних активних джерел струму. Такий підхід дозволяє забезпечити повний цифровий контроль струму в плазмовому утворенні, підвищує стабільність вимірювань і відкриває широкі можливості щодо керування параметрами розряду.

2. Структурна схема і технічні рішення.

Структурну схему генератора представлено на рис. 1, а зовнішній вигляд однієї з останніх модифікацій цифрового універсального генератора ЦУГ-2 – на рис. 2.

Генератор забезпечує формування малопотужних імпульсів пробою розрядного проміжку амплітудою до 12 кВ, дугових імпульсів основного розряду в діапазоні 1...47 А з накладенням допоміжних імпульсів амплітудою до 150 А. Максимальна частота розрядних імпульсів становить 800 Гц. Потужність розряду – до 1 200 Вт.

3. Опис складових частин генератора.

Мікропроцесорний контролер розроблено на базі 32-розрядного вбудованого мікропроцесора STM32F103 виробництва компанії STmicroelectronics. Він забезпечує керування і синхронізацію блоків генератора. Інтерфейс керування генератором реалізовано у вигляді гальваніч-



Рис. 2. Генератор ЦУГ-2

но розв'язаного інтерфейсу SPI, підключеного безпосередньо до блока реєстрації спектрів. Це дозволило забезпечити повну синхронізацію імпульсів розрядного струму з діаграмою зчитування спектральних даних, а також керувати режимами генератора з центрального комп'ютера по єдиному інтерфейсу USB через блок реєстрації спектрів. Також можливе ручне керування генератором через автономну панель керування, яка складається з функціональної клавіатури і монохромного рідкокристалічного індикатора.

Блок стабілізації первинної напруги забезпечує випрямлення і стабілізацію напруги промислової мережі, яка живить генератор. Це має суттєве значення в умовах промислової експлуатації, де стабільна мережа є рідкісним винятком із правила. Основою блока є активний коректор коефіцієнта потужності, викона-

ний з використанням спеціалізованої мікросхеми IR1150 виробництва компанії *International Rectifier*. Блок підтримує первинну напругу 385 В при зміні напруги мережі в діапазоні 120...260 В і забезпечує коефіцієнт потужності в межах 0,93...0,95.

Силове джерело живлення дугового розряду перетворює первинну напругу 385 В на проміжну напругу 55...75 В з гальванічною розв'язкою від первинного кола. Максимальна потужність джерела складає 1 400 Вт. Джерело функціонує за принципом мостового інвертора напруги з частотою перетворення 70 кГц.

На жаль, безпосереднє живлення імпульсної дуги від силового імпульсного джерела важко реалізувати на практиці. У цьому випадку важливі точність підтримки величини струму на виході джерела і висока швидкість наростання струму в розряді після пробою розрядного проміжку. В іншому випадку розряд мимовільно загасає. У результаті було розроблено схему з проміжним ємнісним накопичувачем після силового інвертора напруги на вході наступного блока – джерела струму з цифровим керуванням.

Джерело струму з цифровим керуванням складається з восьми модулів джерел струму (CS1...CS8) на потужних польових транзисторах, налаштованих на фіксовані значення струмів: п'ять джерел по 8 А і по одному на 4 А, 2 А і 1 А. Усі джерела струму включені за принципом ЦАП з складанням струмів: їх вихідні струми складаються в навантаженні. Вони керуються мікропроцесорним контролером по паралельному інтерфейсу, при цьому на входи АЦП мікроконтролера надходять сигнали, що пропорційні до величин вхідної та вихідної напруги і струму. Таке схемне рішення дозволяє формувати вихідний струм у діапазоні 0...47 А з дискретністю в 1 А та швидкістю наростання і спаду не менше 30 А/мкс. Розсіювана потужність розподіляється на кілька силових транзисторів, чим забезпечується безпечний режим їх роботи. Крім того, керуючий контролер регулює величину падіння напруги на транзисторах джерел струму в межах 2...5 В, що забезпечує їх функціонування. У результаті імпульсна потужність, що розсіюється усіма транзисторами, не перевищує 200 Вт при вихідній потужності в імпульсі понад 2 кВт.

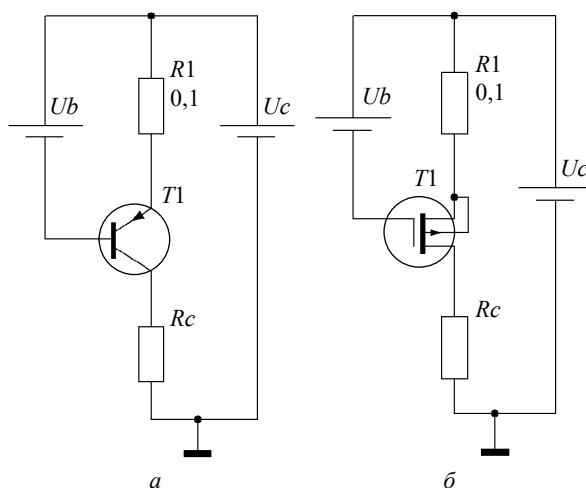


Рис. 3. Схеми джерел струму на біполярному (а) і польовому (б) транзисторах

Було досліджено кілька різновидів джерел струму, в тому числі:

- на біполярному транзисторі MJE15033;
- на складеному біполярному транзисторі з високим коефіцієнтом передачі струму 2N6042;
- на польовому транзисторі IRF9540;
- комбіноване джерело струму на польовому транзисторі з шунтувальним датчиком струму на малопотужному біполярному транзисторі (IRF9540, MMBT5401) [12, 13].

Досліджувалися статична передавальна характеристика, швидкодія і температурна характеристика.

Моделювання провадилося за допомогою програми схемотехнічного моделювання *MicroCap 12* [14] з подальшим макетуванням.

Перші три різновиди джерел струму були створені за схемою, яка містить джерело напруги U_b в колі бази (заслону) і струмозадавальний резистор R_1 в колі емітера (витоку). У всіх випадках величина струмозадавального резистора була однаковою – 0,1 Ом. Схеми джерел струму на біполярних і польовому транзисторах представлено на рис. 3, комбінована схема – на рис. 4 [12, 13].

Величина вихідного струму, що генерується пристроєм, визначається виразом [15]

$$I_c = (U_b - U_i) / R_1,$$

де U_i – порогова напруга «база–емітер» («заслін–витік») переходу транзистора в провідний стан. Для біполярних транзисторів з температурним коефіцієнтом 1,7 мВ/К – $U_i = 0,6...0,7$ В

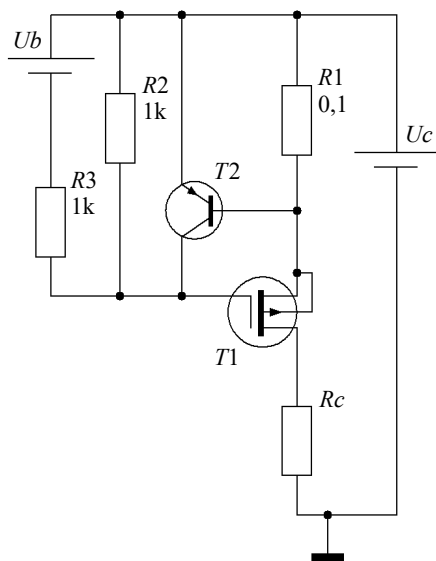


Рис. 4. Схема комбінованого джерела струму

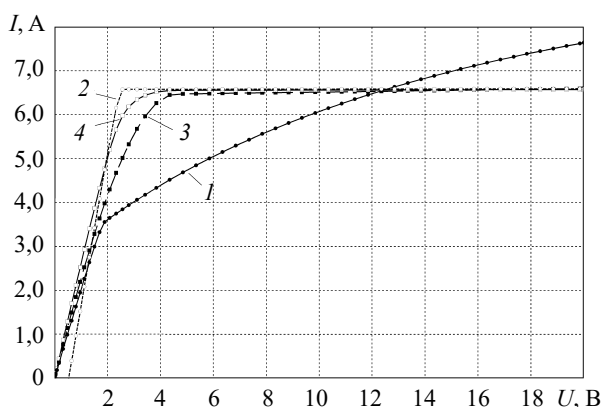


Рис. 5. Статичні вольтамперні характеристики модулів джерел струму: 1 – на біполярному транзисторі (*MJE15033*); 2 – на складеному біполярному транзисторі (*2N6054*); 3 – на польовому транзисторі (*IRF9540*); 4 – побудованого за комбінованою схемою (*IRF9540 + MMBT5401*)

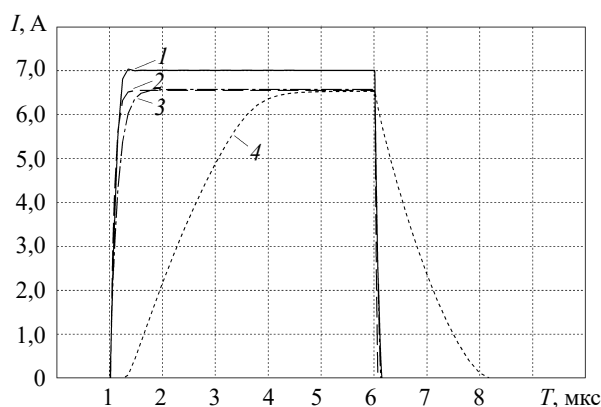


Рис. 6. Реакції на прямокутний імпульс модулів джерел струму: 1 – на біполярному транзисторі (*MJE15033*); 2 – на польовому транзисторі (*IRF9540*); 3 – на складеному біполярному транзисторі (*2N6054*); 4 – за комбінованою схемою (*IRF9540 + MMBT5401*)

[15, 16], для польових з температурним коефіцієнтом $5 \text{ мВ/К} - U_i = 4 \dots 5 \text{ В}$ [16].

Результати моделювання вихідної характеристики джерел струму залежно від напруги живлення представлено на рис. 5. Найнижчий вихідний опір і мінімальну нелінійність передавальної характеристики має генератор струму на стандартному біполярному транзисторі (*MJE15033*). Основними причинами цього є вплив ефекту Ерлі (модуляції ширини бази колекторною напругою) і низький коефіцієнт передачі по струму (~ 10) при струмах колектора, близьких до максимального [16]. Найкращу характеристику має джерело струму на складеному біполярному транзисторі (*2N6054*), що пояснюється високим коефіцієнтом передачі по струму. Відмінною особливістю складових транзисторів є підвищена напруга насичення колектор–емітер, що обумовлює зміщення початкових значень струму на графіку з напругою $0,7 \dots 0,8 \text{ В}$ [16].

Крутизна статичної вольтамперної характеристики джерела струму на польовому транзисторі (*IRF9540*) на початковій лінійній ділянці обумовлена крутизною характеристики та опором каналу транзистора, а також величиною опору в витоківому колі. В області насичення слабке зростання струму стоку пояснюється модуляцією довжини каналу при збільшенні напруги. Комбінована схема поєднує високу крутизну характеристики на лінійній ділянці, що пояснюється високим рівнем напруги на заслоні, і високий диференціальний опір в області обмеження струму за рахунок високого коефіцієнта посилення малопотужного біполярного транзистора.

Для АЕСА важливе значення мають швидкість наростання і спаду імпульсів струму в розряді. Висока швидкість наростання струму забезпечує необхідні передумови для появи важкобуджуваних іонних ліній з високими рівнями іонізації. Висока швидкість спаду дозволяє скористатись методиками реєстрації післясвітіння ліній аналізованого елемента після закінчення основного струму в розряді для випадку спектроскопії з часовим розділенням [10].

Реакції розглянутих модулів (рис. 3 і 4) на прямокутний вхідний імпульс струму тривалістю 5 мкс наведено на рис. 6. Всі графіки отримано для активного навантаження 5 Ом при нарузі 50 В .

Як видно з рис. 6, перевагу мають джерела струму на стандартному біполярному і польовому транзисторах. Швидкість наростання та спаду струму у колах колектора (витоку) становить 31 А/мкс. Дещо гірші результати показує джерело на складеному біполярному транзисторі. Тут швидкість наростання струму становить величину ~ 17 А/мкс, що пояснюється гіршими частотними властивостями складових транзисторів. Найгірші результати показало джерело струму, побудоване за комбінованою схемою, в якій швидкість наростання струму складає 2,6 А/мкс. Це пояснюється великою сталою часу кола заслону, що обумовлена опором струмообмежувального резистора $R3$, розрядного резистора $R2$ і ємністю заслону (для цього транзистора ~ 1 400 пФ) (рис. 4). Слід зазначити, що реакція модуля джерела струму на польовому транзисторі (рис. 3, б) моделювалася шляхом заміни джерела напруги зміщення заслону U_b імпульсним генератором з вихідним опором 10 Ом. У випадку застосування для керування схеми з відкритим колектором, з вихідним опором кілька кілоомів, реакція цього варіанта модуля на прямокутний імпульс вельми близька до тієї, яку має модуль, побудований за комбінованою схемою (рис. 4). Для усунення цього недоліку в модуль, схема якого зображена на рис. 4, були внесені зміни (рис. 7). Був доданий драйвер заслону, який виконаний за схемою двотактного емітерного повторювача на двох комплементарних біполярних транзисторах. Це дозволило одержувати зарядний струм ємності заслону величиною аж до 1 А.

Рис. 8 дозволяє порівняти реакції модулів джерел струму, схеми яких зображено на рис. 4 і 7, на прямокутний імпульс тривалістю 5 мкс.

У запропонованій модифікації схеми затримка включення зменшилася з 280 до 140 нс, а швидкість наростання струму збільшилася з 2,6 до 31 А/мкс. Наявність короткого (~ 1 мкс) перехідного процесу на фронті імпульсу в цьому випадку можна вважати позитивною властивістю, бо вона забезпечує форсування струму в початковій фазі виникнення розряду.

Комп'ютерне моделювання температурних характеристик запропонованих джерел струму викликає певні труднощі. Це пов'язано з відсутністю температурних параметрів у наявних SPICE-моделях застосовуваних транзисторів, а

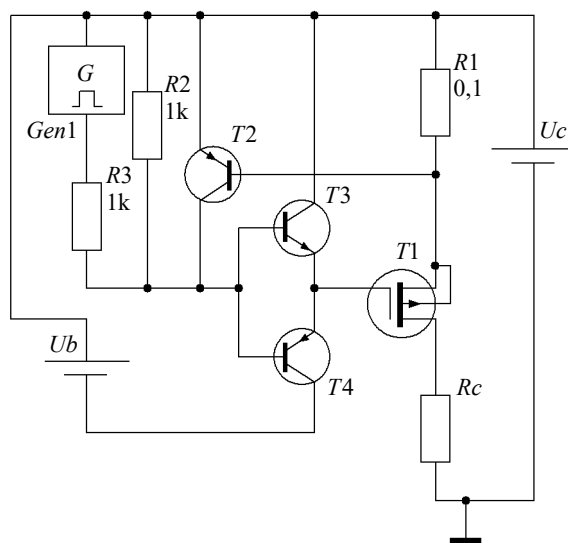


Рис. 7. Удосконалена схема комбінованого джерела струму

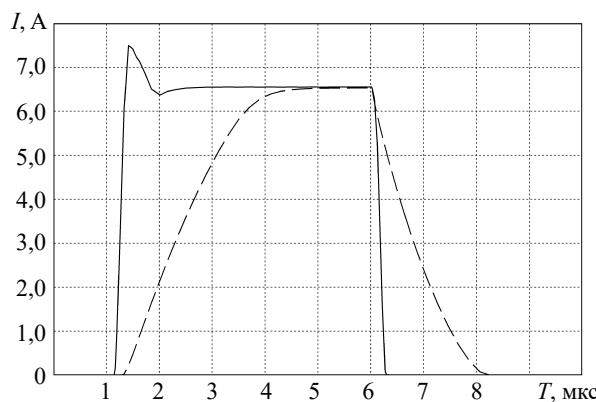


Рис. 8. Порівняння реакцій на прямокутний імпульс модулів комбінованих джерел струму, схеми яких наведено на рис. 4 (штрихова лінія) і рис. 7 (суцільна лінія)

також складністю врахування в реальній апаратурі такого важливого для потужних напівпровідникових компонентів конструктивного фактора як тепловідведення.

Аналітична оцінка дрейфу вихідного струму для джерела струму на біполярному транзисторі визначається виразом [16]:

$$\frac{dI}{dT} = \frac{1}{R_1} \frac{dU_{BE}}{dT} \approx \frac{2mV / K}{R_1}$$

Для польового транзистора залежність більш складна, оскільки величина його порогової напруги залежить від типу транзистора, його параметрів і технології виготовлення. При зміні температури змінюється не тільки гранична напруга, але й крутизна характеристики та опір каналу.

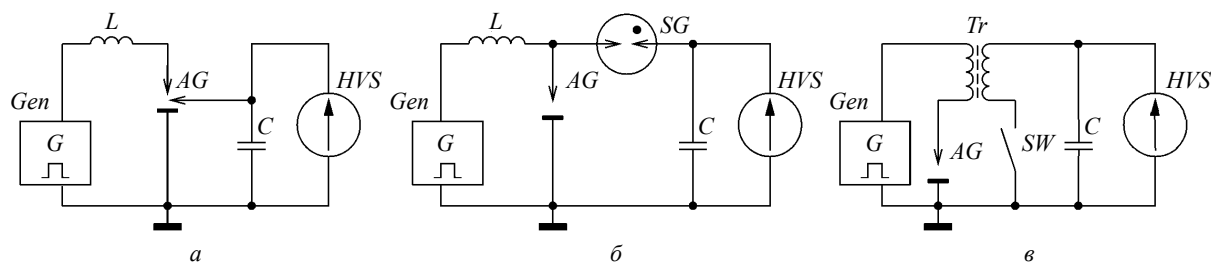


Рис. 9. Триелектродна (а), паралельна (б), послідовна (в) схеми пробою розрядного проміжку: Gen – генератор імпульсів основного струму; HVS – допоміжне високовольтне джерело струму; AG – аналітичний розрядний проміжок; SG – додатковий газовий розрядник; SW – ключ розряду накопичувального конденсатора схеми ініціації

У літературі наводиться діапазон можливих значень температурної залежності порогової напруги польових МОН-транзисторів на інтервалі $-2...-5$ мВ/К [16].

Температурна характеристика комбінованих структур (рис. 4 і 7) визначається в основному відповідною характеристикою біполярного транзистора T2. Перевагами цих структур є те, що в них допоміжний біполярний транзистор T2 розсіює досить незначну потужність і працює при температурі навколишнього середовища; основне ж теплове навантаження при цьому припадає на транзистор T1 з додатковим тепловідводом.

У результаті, з урахуванням сукупності перелічених параметрів, генератор був побудований за схемою, яка представлена на рис. 7.

Блок пробою розрядного проміжку забезпечує високовольтний пробій і початкову йонізацію розрядного проміжку. До цього вузла висуюються суперечливі вимоги:

- він повинен формувати високовольтні імпульси амплітудою не менше 10 кВ;
- частота прямування цих імпульсів має досягати 1 кГц;
- індуктивність, яку блок вносить у розрядний контур, повинна бути мінімальною задля запобігання обмеження швидкості наростання струму.

Існує кілька схемних рішень пристрою, який може задовольнити переліченим вимогам:

- схема з послідовним включенням високовольтної обмотки трансформатора в розрядний контур;
- схема з паралельним розрядом високовольтного конденсатора;
- триелектродна схема (рис. 9).

У процесі досліджень були випробувані всі три варіанти. Було встановлено, що триелек-

тродна схема вносить мінімальну паразитну індуктивність у розрядний контур, але істотно ускладнює електродний вузол і вимагає постійного підстроювання. Це викликає великі труднощі, особливо в виробничих умовах. Крім того, третій електрод є додатковим джерелом забруднення плазми розряду. Побудова паралельної схеми можлива тільки за допомогою газового розрядника і вимагає його періодичної заміни або обслуговування. Без використання розрядників вдалося створити тільки послідовну схему. Індуктивність, яка вноситься в розрядний контур при використанні феритового трансформатора в режимі насичення, не перевищує 20 мкГ. Імпульс струму в первинній обмотці трансформатора формується за рахунок розряду імпульсного конденсатора. Він, заряджений до напруги 600 В, розряджається через пару швидкодіючих напівпровідникових ключів, включених за схемою асиметричного прямоходового напівмостового перетворювача. Таке схемне рішення забезпечує рекуперацію імпульсів, пов'язаних з індуктивністю розсіювання трансформатора, і обмежує величину напруги на комутуючих ключах величиною напруги живлення.

Для гнучкого керування блоком і забезпечення контрольованих режимів роботи було застосовано однокристальний мікроконтролер ATtiny13A виробництва компанії Atmel. У результаті пробійна напруга на розрядному проміжку може досягати 18 кВ. Цим забезпечується стабільний пробій розрядного проміжку навіть в умовах сильного окиснення і забруднення проби та протиелектрода. Максимальна частота проходження розрядів складає 800 Гц. Для зменшення впливу індуктивності та ємності сполучних проводів, а також зниження рівня електромагнітних завад блок пробою роз-

рядного проміжку виконано у вигляді окремого пристрою та розташовано в безпосередній близькості від розрядної камери.

Блок формування початкового імпульсу розрядного струму (бустер) служить для розширення діапазону режимів іонізації плазми, контролю процесів пробовідбору і підвищення стабільності горіння розряду. У початковій фазі розряду блок формує короткий (~10...30 мкс) імпульс струму амплітудою до 150 А. Блок складається з імпульсного конденсатора, підключеного паралельно до розрядного проміжку, і кола для його заряджання. При цьому величина напруги на конденсаторі регулюється в межах 200...600 В.

Блок керування параметрами захисного газового середовища служить для створення і підтримки контрольованого газового середовища в розрядній камері. Як правило, розрядна камера продувається аргоном. Інтенсивність продувки, а також тиск у розрядній камері, контролюються за допомогою мікропроцесорного контролера генератора, а саме платою комутації електромагнітних реле і клапанів. Інертний газ у розрядному проміжку забезпечує такі переваги:

- дозволяє використовувати в розрядному вузлі незмінний вольфрамовий протиелектрод з тривалим терміном служби;
- значно знижує окиснювальні процеси на пробі;
- прибирає із спектра молекулярні смуги, що маскують значні його ділянки;
- підвищує чутливість аналізу;
- розширює інтервал лінійності калібрувальних графіків;
- дозволяє проводити аналіз в області вакуумного ультрафіолету з довжинами хвиль коротше 195 нм, де поширення світла блокується киснем повітря [3].

Блок керування параметрами захисного газового середовища складається з декількох електромагнітних газових клапанів, які комутують потоки газу, дроселів, що регулюють витрату газу, манометра і датчика тиску газу на вході газової магістралі і в розрядній камері.

4. Порівняння розробленого генератора з промисловим генератором УГЕ-4. Під час експлуатації генератора ЦУГ-2 були здійснені вимірювання параметрів розрядного кола, характерних напруг і струмів плазмових утворень,

а також зареєстровані їх спектральні характеристики.

Випробування генератора ЦУГ-2 полягали в порівняльних дослідженнях з використанням джерел випромінювання різних типів – промислових генераторів іскри/дуги, спектральних ламп з порожнистим катодом та напівпровідникових світлодіодів. Випробування в реальних заводських умовах відбувалися з використанням як стандарту одного з кращих генераторів серійного виробництва – УГЕ-4 [17]. Генератори ЦУГ-2 і УГЕ-4 було встановлено в двох різних лабораторіях в комплекті з однаковими спектрографами ІСП-30 і однаковими системами реєстрації спектра, котрі описані в [5, 7].

Оскільки в обох лабораторіях використовувалися однакові спектрографи і системи реєстрації, то пов'язана з ними компонента помилки в різниці результатів мінімізувалася. Завдяки цьому з'явилася можливість отримати компоненту помилки генераторів, вільну від впливу помилок як оптичного вузла, так і блока реєстрації спектра. В обох випадках використовувався той же самий зразок сталі та фотометрувалися ті ж самі спектральні лінії за максимально близьких умов. Для забезпечення надійної статистики було виконано $N \approx 500$ вимірювань амплітуди двох спектральних ліній A_i ($0 \leq i \leq N$) при однакових експозиціях. За результатами цих вимірювань визначалося вибіркоче середнє значення

$$A_m = \frac{\sum_{i=0}^N A_i}{N + 1}$$

і відносне відхилення

$$\Delta_i = \frac{A_i - A_m}{A_m}.$$

На рис. 10 в графічному вигляді представлено відносні відхилення одиночних вимірювань для спектральної лінії заліза 324,4 нм, одержані за допомогою генераторів УГЕ-4 (точки) і ЦУГ-2 (крива). Слід звернути увагу на більший розкид точок порівняно з розкидом поличок ступінчастої кривої.

Для отримання чисельних характеристик обчислювалися моменти розподілу величини Δ_i . Оскільки випадкова величина Δ_i є центрованою, центральний момент першого порядку для неї дорівнює нулю. Другий центральний

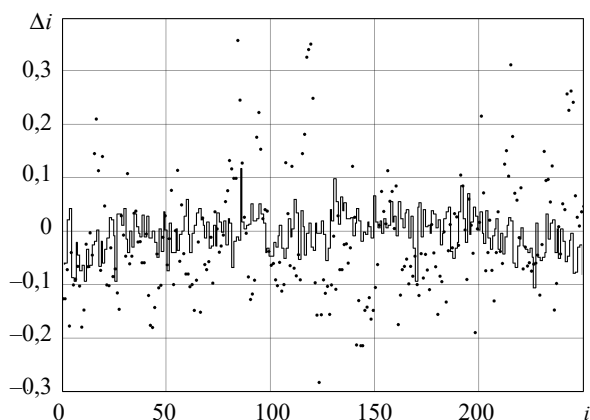


Рис. 10. Результати вимірювань розкиду одиничних вимірювань спектральної лінії Fe – 324,4 нм, одержані за допомогою генераторів УГЕ-4 (точки) і ЦУГ-2 (крива); i – порядковий номер вимірювання

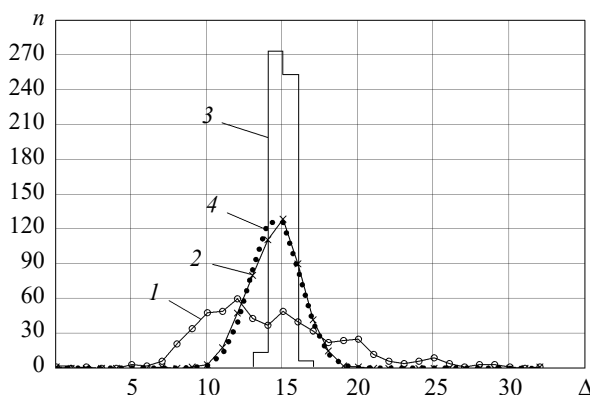


Рис. 11. Гістограми розподілів даних вимірювань Δ для генераторів УГЕ-4 (крива 1), ЦУГ-2 (крива 2), світлодіодного джерела випромінювання (крива 3) і нормального розподілу (крива 4). Дані масштабовані по площі під кривою розподілу

Співвідношення між СКВ під час використання генераторів ЦУГ-2 і УГЕ-4

Генератор	СКВ		
	$\lambda = 321,9$ нм	$\lambda = 324,4$ нм	Середнє СКВ
УГЕ-4	0,117	0,140	0,1285
ЦУГ-2	0,041	0,043	0,042
УГЕ-4/ЦУГ-2	2,84	3,27	3,055

момент, який є характеристикою ступеня розсіювання результатів вимірювань (дисперсії), обчислюється через суму квадратів вибірових відхилень таким чином:

$$D = \frac{1}{N-1} \sum_i \Delta_i^2,$$

де N – загальна кількість відліків.

Для перевірки нормальності закону розподілу побудовано гістограми (рис. 11).

З рис. 11 випливає, що симетрія та ексцес даних, отриманих за допомогою генератора ЦУГ-2, набагато ближче до нормального розподілу, ніж даних, отриманих з використанням промислового генератора УГЕ-4. Особливо сильно вирізняється затягнутий задній фронт гістограми, яка відповідає УГЕ-4. Він свідчить про рідкісні, але відносно великі позитивні викиди реєстрованого сигналу, які зазвичай спостерігаються під час повільних переміщень зображення плазмового факела по щілині спектрографа.

Строго кажучи, у зв'язку з відмінностями в законах розподілу, вживання кількісних критеріїв не правомірне, але при якісних оцінках перевага явно на користь ЦУГ-2. Про це свідчить і порівняльна таблиця, де представлено чисельні значення середньоквадратичного відхилення (СКВ). Вони дорівнюють квадратному кореню з дисперсії D для двох спектральних ліній заліза ($\lambda = 321,9$ і $324,4$ нм).

Отже, якщо припустити однаковий закон розподілу випадкової величини Δ_i для обох генераторів, то генератор ЦУГ-2 значно (більш ніж в 3 рази) перевершує за точністю УГЕ-4.

Висновки. Проаналізовано основні вимоги, що висуваються до іскрових і дугових джерел збудження спектра АЕСА та сформульовано принципи їх побудови. Показано переваги генераторів з активним формуванням розрядного струму. Спроектовано і виготовлено генератор з високими метрологічними характеристиками, який має розширені експлуатаційні та сервісні можливості, а також значно поліпшені масогабаритні характеристики і параметри енергоефективності. Це досягнуто за рахунок реалізації в генераторі таких технічних рішень:

- запропоновано схемне рішення формування вихідного струму, побудованого за принципом потужного ЦАП з підсумовуванням струмів. Проведено аналіз статичних, динамічних і температурних характеристик декількох варіантів модулів джерел струму. Розроблено схемне рішення джерела струму, яке забезпечує поєднання статичної і температурної стабільності з високою швидкодією;

- розроблено і введено бустерний вузол для формування початкового імпульсу розрядного струму, завдяки чому істотно підвищується

стабільність процесів пробовідбору і подальшого основного розряду;

- розроблено конструкцію вузла високовольтного пробою розрядного проміжку, яка має високу надійність і не вимагає періодичного обслуговування.

Порівняльні випробування генераторів в умовах заводських лабораторій свідчать про те, що

СКВ експериментальних даних, отриманих за допомогою генератора ЦУГ-2, в три рази менше, ніж даних, отриманих з допомогою генератора УГЕ-4. Цей висновок зроблено на підставі результатів статистичної обробки великого обсягу експериментального матеріалу за методикою, викладеною в [18] і в публікаціях [7, 19, 20].

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Чудновский С.М., Лихачева О.И. *Приборы и средства контроля за природной средой*. Учеб. пособие. Москва: Инфра-Инженерия, 2017. 152 с.
2. Барсуков В.И. *Атомный спектральный анализ*. Москва: Машиностроение-1, 2005. 109 с. URL: <https://tstu.ru/book/elib/pdf/2005/barsukov1.pdf>
3. *Новый справочник химика и технолога. Аналитическая химия*. Ч. 2. Под ред. И.Л. Калинкина. СПб.: НПО «Профессионал», 2005. 1264 с. URL: http://chemanalytica.com/book/novyyu_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/03_analiticheskaya_khimiya_chast_II/5030
4. *Основы аналитической химии*. В 2 т. Т. 2. Под ред. Ю.А. Золотова. 5-е изд. Москва: Изд. центр «Академия», 2012. 416 с.
5. Егоров А.Д., Егоров В.А., Егоров С.А., Синельников И.Е., Бабаков М.Ф. Мультисенсорная камера для спектральных измерений на приборах с зарядовой связью линейной структуры. *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. 2019. Т. 90, № 2. С. 80–88. DOI: 10.32620/reks.2019.2.07.
6. Егоров А.Д., Егоров В.А., Егоров С.А., Моторненко А.П., Корж В.Г., Здор Е.В., Скуратовский И.Г. Автоматизированный спектрометр для эмиссионного спектрального анализа. *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины. Харьков, 1999. Т. 4, № 3. С. 148–153.
7. Yegorov A.D., Yegorov V.A., Yegorov S.A. Dynamic range of CCD photosensors for atomic-emission analyzers. *J. Appl. Spectrosc.* 2019. Vol. 86(10), Iss. 3. P. 443–448. DOI: 10.1007/s10812-019-00839-9.
8. Иванов В.А., Сухомлинов В.С. Дуговые генераторы. Новое поколение генераторов дугового разряда ПРИМА для спектрального эмиссионного анализа элементного состава веществ. URL: <http://prima-ivs.ru/content/view/21/48/>
9. Мандрик Е.М. Семейство электрических источников возбуждения атомно-эмиссионных спектров «Шаровая молния». *Аналитика и контроль*. 2005. Т. 9, № 2. С. 129–134.
10. Источник возбуждения спектра для эмиссионного спектрального анализа SPARK-500. URL: <http://okb-spectr.ru/products/es/spark500>
11. Кеттеннис М. Цифровой генератор – новый тип источника в возбуждения в оптической эмиссионной спектрометрии. *Аналитика и контроль*. 2003. Т. 7, № 2. С. 172–175.
12. Иволгин В.И. Простые электронные ограничители тока. *Радиолюцман*. 2017. № 2 (69). С. 28–32. URL: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=335397>
13. Adjustable Low Drop Current Limiter 2014-03-28. URL: <http://www.electro-tech-online.com/articles/adjustable-low-drop-current-limiter.660>
14. Micro-Cap 12. Spectrum Software. URL: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml>
15. Хоровиц П., Хилл У. *Искусство схемотехники*. Пер. с англ. Изд. 7-е. Москва: БИНОМ, 2014. 704 с.
16. Титце У., Шенк К. *Полупроводниковая схемотехника*. 12-е изд. Т. 1. Пер. с нем. Москва: ДМК Пресс, 2008. 832 с.
17. *Универсальный генератор с электронным управлением УГЭ-4*. Техническое описание и инструкция эксплуатации. Москва: Внешторгиздат, 1980. 128 с.
18. Косарев, Е.Л. *Методы обработки экспериментальных данных*. Москва: Физматлит, 2008. 208 с.
19. Егоров А.Д., Егоров В.А., Егоров С.А., Синельников И.Е. Удосконалені методики обробки даних в оптичних спектрометрах. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського*. Сер. Технічні науки. 2019. Т. 30 (69), № 3, ч. 1. С. 46–50. DOI: 10.32838/2663-5941/2019.3-1/08.
20. Егоров А.Д., Егоров В.А., Егоров С.А., Синельников И.Е. Дослідження можливості компенсації ефекта блумінга ПЗЗ-детекторів оптичного спектра. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*. 2019. № 5–6. С. 8–15.

Стаття надійшла 15.06.2020

REFERENCES

1. Chudnovskii, S.M., Likhacheva, O.I., 2017. *Devices and controls for environmental monitoring*. Moscow: Infra-Inzheneriya Publ. (in Russian).
2. Barsukov, V.I., 2005. *Atomic Spectral Analysis*. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ. (in Russian). Available from: <https://tstu.ru/book/elib/pdf/2005/barsukov1.pdf>
3. Kalinkin, I.L. ed., 2002. *New reference chemist and technologist. Analytical chemistry*. Pt. 2. St. Petersburg: Professional Publ. (in Russian). Available from: http://chemanalytica.com/book/novyyu_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/03_analiticheskaya_khimiya_chast_II/5030
4. Zolotov, Yu.A. ed., 2012. *Fundamentals of analytical chemistry*. Moscow: Akademiya Publ. (in Russian).

5. Yegorov, A.D., Yegorov, V.A., Yegorov, S.A., Sinelnikov, I.E., Babakov, M.F., 2019. Multisensor linear CCD camera for spectrometry. *Radioelectronic and computer system*, **90**(2), pp. 80–88. DOI: 10.32620/reks.2019.2.07 (in Russian).
6. Egorov, A.D., Egorov, V.A., Egorov, S.A., Motornenko, A.P., Korzh, V.G., Zdor, E.V., Skuratovskii, I.G., 1999. Automated spectrometer for emission spectral analysis. In: V.M. Yakovenko, ed. 1999. *Radiofizika i elektronika*. Kharkiv: IRE NAS of Ukraine Publ. **4**(3), pp. 148–153 (in Russian).
7. Yegorov, A.D., Yegorov, V.A., Yegorov, S.A., 2019. Dynamic range of CCD photosensors for atomic-emission analyzers. *J. Appl. Spectrosc.*, **86**(3), pp. 443–448. DOI: 10.1007/s10812-019-00839-9.
8. Ivanov, V.A. A new generation of PRIMA arc generators for spectral emission analysis of the elemental composition of substances (in Russian). Available from: <http://prima-ivs.ru/content/view/21/48/>
9. Mandrik, E.M., 2005. The family of electrical sources of excitation of atomic emission spectra «Ball lightning». *Analitika i kontrol'*, **9**(2), pp. 129–134 (in Russian).
10. Spectrum excitation source for emission spectral analysis SPARK-500 (in Russian). Available from: <http://okb-spectr.ru/products/es/spark500/>
11. Kettennis, M., 2003. Digital generator – a new type of source in excitations in optical emission spectrometry. *Analitika i kontrol'*, **7**(2), pp. 172–175 (in Russian).
12. Ivolgin, V.I., 2017. Simple electronic current limiters. Moscow. *Radiolotsman*, **2**(69), pp. 28–32 (in Russian). Available from: <https://www.rlocman.ru/review/article.html?di=335397>
13. Adjustable Low Drop Current Limiter 2014-03-28. Available from: <http://www.electro-tech-online.com/articles/adjustable-low-drop-current-limiter.660>
14. Micro-Cap 12. Spectrum Software. Available from: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml>
15. Horowitz, P., Hill, W., 1989. *The Art of Electronics*. 2nd ed. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-37095-0.
16. Tittse, U., Shenk, K., 2008. *Semiconductor Circuitry: Reference Guide*. Translated from German. Moscow: DMK Press. Vol. 1. (in Russian).
17. *Universal generator with electronic control UGE-4*. Technical description and operating instructions. 1980. Moscow: Vneshtorgizdat Publ. (in Russian).
18. Kosarev, E.L., 2008. *Methods for processing experimental data*. Moscow: Fizmatlit Publ. (in Russian).
19. Yegorov, A.D., Yegorov, V.A., Yegorov, S.A., Sinelnikov, I.E., 2019. Improved methods of data processing in optical spectrometers. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky Univ. Ser. Technical Sci.*, **30**(3–1), pp. 46–50 (in Ukrainian).
20. Yegorov, A.D., Yegorov, V.A., Yegorov, S.A., Sinelnikov, I.E., 2019. Investigation of the possibility to compensate for the blooming effect in CCD optical spectral sensors. *Tekhnologiya i Konstruivovanie v Elektronnoi Apparature*, **5–6**, pp. 8–15. DOI: 10.15222/TKEA2019.5-6.08 (in Ukrainian).

Received 15.06.2020

A.D. Yegorov, S.A. Yegorov, V.A. Yegorov, I.E. Sinelnikov

O.Ya. Usikov IRE of NASU

12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

AN ARC PLASMA GENERATOR FOR THE ATOMIC EMISSION ANALYZER WITH DIGITALLY CONTROLLED DISCHARGE PARAMETERS

Subject and Purpose. The subject of the work is atomic emission spectral analysis of substances using the most affordable arc and spark sources widely accepted in both laboratory and industrial practice. The aim is to improve solution principles of some technical problems in the field of construction of power supplies of arc and spark discharges with predetermined properties and to study their parameters.

Methods and Methodology. Traditional methods of producing spark and arc discharges are used. Several designs are proposed for discharge current and discharge gap breakdown power supplies, modeled using a computer program of circuit simulation and tested on the existing prototypes. The developed generator was put through tests and compared with a production analog of it in terms of statistical analysis of spectrum measurement results.

Results. The microprocessor-controlled arc plasma generator “TsUG-2” has been developed and performed. The discharge current generation unit was constructed on the principle of digital-to-analog converter (DAC) with current summation. The discharge gap breakdown unit was performed on the semiconductor circuitry basis without any gas spark gaps. A unit was added for generating the initial pulse of discharge current, which made it possible to extend the spectrum excitation range, provide the sampling process control and improve the discharge combustion stability. A parameter control unit was developed to create and maintain the protective gas environment in the discharge chamber. The control over the operating modes of the generator and its synchronization with the spectrum recording equipment is exerted through an external interface. The manual control is carried out via a stand-alone control panel. The created generator “TsUG-2” produces discharge gap breakdown pulses of up to 12 kV amplitudes and arc pulses spanning a discharge current range as wide as 1...47 A. On them, additional current pulses of up to 150 A amplitudes can be superimposed, which significantly increases the rate of discharge current rise. The highest frequency of the discharge excitation pulses is 800 Hz. Comparison tests of the developed generator “TsUG-2” and a production generator “UGE-4” have been carried out.

Conclusion. The measurement results show that the standard deviation (RMS) of the photometric data of plasma formations obtained from the developed arc plasma generator “TsUG-2” is, on the average, three times less than from a production generator “UGE-4”.

Key words: atomic emission spectral analysis, arc spectrum source, spark spectrum source, current source.