

УДК 681.518.2

О. В. ШУЛЬГА, доктор техн. наук, доцент;

О. В. ШЕФЕР, канд. техн. наук, доцент;

Д. М. НЕЛЮБА, канд. техн. наук;

М. М. ГОНТАР,

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЛАЗМИ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ КОСМІЧНОГО АПАРАТА

**Описано метод ідентифікації космічних апаратів (КА) за неконтрольованим випромінюванням (НКВ), який полягає в аналізі випромінювання бортової апаратури (БА) виявленого космічного об'єкта (КО) і порівнянні з математичними моделями процесів, які мають бути ідентифіковані. Це дозволить підвищити якість функціонування системи контролю космічного простору. Пропонований метод не лише забезпечує додаткові відомості про роботу БА спостережуваних КА, а й дає змогу класифікувати КО за особливостями роботи в пасивному режимі локації внутрішніх систем КА.**

**Ключові слова:** космічний апарат; плазма; бортова система навігації та мобільного зв'язку; густина потужності; коливання гетеродина; динамічна модель; кусково-лінійна апроксимація; радіотехнічна станція.

### Вступ

Розвиток сучасних засобів навігації та телекомунікацій, що працюють в імпульсному режимі на борту КА, вимагає розробки й упровадження джерел випромінювання плазми оптичного діапазону зі стабільними енергоощадними характеристиками та зручними експлуатаційними параметрами [1].

### Аналіз попередніх досліджень

Усі відомі дослідження особливу увагу приділяють надійності роботи джерел випромінювання в пускових режимах за різних умов експлуатації. Такий підхід дозволяє використовувати зазначені джерела в багатьох приладах телекомунікацій і в системах навігації [2].

Важливим є спектр випромінювання джерела навігаційного пристрою чи засобу телекомунікації, оскільки довжина світлової хвилі являє собою істотну ознаку середовища (повітряний простір, вакуум тощо) її поширення. Наприклад, спектральні характеристики джерела випромінювання високої інтенсивності визначаються галоїдними домішками, що вводяться в розрядні пальники, а саме:  $TlJ$  дає зелений,  $NaJ$  — помаранчевий, а  $InJ_3$  — синій колір випромінювання. Поєднуючи ці домішки в певній пропорції, отримуємо практично будь-який спектр видимого діапазону, а отже, уможливіємо утворення «вікна» в суцільному шарі плазми вздовж зовнішньої оболонки КА для передавання інформації в імпульсному режимі.

При дослідженні та конструюванні плазмових пристроїв актуалізується проблема пускового режиму в розрядному об'ємі [3; 4]. Пуск (запалювання) залежить від різних параметрів: діаметра і довжини розрядної області, роду газу, що її наповнює, температури навколишнього середовища.

### Мета статті

Поставлено завдання визначити залежність пускової напруги (напруги запалювання)  $U_3$  від напруги  $U_\phi$  формування основного розряду в розрядному пальнику.

### Основна частина

Взаємозв'язок між напругою  $U_\phi$  формування розряду і напругою  $U_3$  запалювання подається як функціональна залежність  $U_3 = f(U_\phi)$ , використовувана в розрахунках плазмового пристрою [5].

Напругу  $U_\phi$  формування розряду для різних значень радіуса  $R$  пальника і тиску  $P$  газу (у даному випадку — аргону) в пальнику знаходимо зі співвідношення

$$U_\phi = f(R, P), \quad (1)$$

$$U_\phi = 1,33 \cdot K^{\frac{1}{4}} + \varepsilon_0^{\frac{1}{4}} C^{\frac{3}{4}} P^{\frac{3}{4}} j_0^{\frac{1}{4}},$$

де  $K$  — коефіцієнт рухливості іонів,  $K = 2 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ ;

$\varepsilon_0$  — діелектрична стала аргону,  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;

$C$  — коефіцієнт, що визначає рід газового середовища і залежить від радіуса пальника;

$j_0$  — густина електронного струму на межі плазми,  $j_0 = 10 \text{ А/м}^2$ ;

$P$  — тиск аргону в пальнику,  $P = 1330; 2660; 3990; 6650 \text{ Па}$ .

Для визначення напруги  $U_3$  запалювання через напругу  $U_\phi$  формування розряду попередньо обчислимо коефіцієнти  $k$  пропорційності  $k = \frac{U_3}{U_\phi}$  для різних значень тиску  $P$  аргону і радіуса  $R$  пальника.

Значення  $U_\phi$  обчислюємо згідно з (1).

Коефіцієнти  $k$  для різних значень  $U_\phi$  і  $U_3$  знаходимо математичною обробкою статистичних даних [1]:

$$k_1 = 5,5 \pm 0,3; k_2 = 3,1 \pm 0,1;$$

$$k_3 = 2,3 \pm 0,1; k_4 = 1,6 \pm 0,3.$$

Результати виконаних обчислень подаємо відповідно в табл. 1–4.

Зауважимо, що за нормального розподілу помилка  $X_0$  спостереження також розподілена за нормальним законом

$$P(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-X_0)^2}{2\sigma^2}},$$

із математичним сподіванням, яке дорівнює істинному значенню  $X_0$  спостережуваної величини (у нашому випадку коефіцієнта  $k$ ), і дисперсією  $\sigma^2$ . Це означає, що окреме спостереження являє собою елемент із нескінченної множини спостережень, які можуть бути виконані в однакових умовах із середньою помилкою  $\sigma$ . Ця нескінченна множина можливих спостережень утворює нормальну генеральну сукупність, середнє арифметичне якої дорівнює математичному сподіванню, тобто значенню  $X_0$ .

Таблиця 1

**Значення  $R, U_\phi, U_3$  та  $k_1$  для пальників із тиском аргону  $P_1 = 1330$  Па = const при температурі  $t = 20$  °C = const**

$R, \text{мм}$	$U_\phi, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$k_1 = U_3/U_\phi$
5,5	31,6	192 ± 6	6,07
10	30,7	162 ± 8	5,3
13	29,8	167 ± 3	5,6
14,5	29,4	164 ± 4	5,5

Таблиця 2

**Значення  $R, U_\phi, U_3$  та  $k_2$  для пальників із тиском аргону  $P_2 = 2660$  Па = const при температурі  $t = 20$  °C = const**

$R, \text{мм}$	$U_\phi, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$k_2 = U_3/U_\phi$
5,5	53,1	170 ± 9	3,2
10	51,6	151 ± 3	2,92
13	50,1	164 ± 2	3,3
14,5	49,5	150 ± 2	3

Таблиця 3

**Значення  $R, U_\phi, U_3$  та  $k_3$  для пальників із тиском аргону  $P_3 = 3990$  Па = const при температурі  $t = 20$  °C = const**

$R, \text{мм}$	$U_\phi, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$k_3 = U_3/U_\phi$
5,5	72	164 ± 4	2,28
10	70	154 ± 9	2,2
13	68	168 ± 8	2,5
14,5	67	150 ± 2	2,2

Таблиця 4

**Значення  $R, U_\phi, U_3$  та  $k_4$  для пальників із тиском аргону  $P_4 = 6650$  Па = const при температурі  $t = 20$  °C = const**

$R, \text{мм}$	$U_\phi, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$k_4 = U_3/U_\phi$
5,5	105,5	167 ± 9	1,58
10	102,6	167 ± 2	1,63
13	99,7	168 ± 2	1,68
14,5	98,3	158 ± 4	1,6

Математичне сподівання обчислюємо за формулою

$$X_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (2)$$

де  $n$  — кількість спостережень.

Дисперсію  $S$  (вибірковий стандарт) визначаємо за формулою Бесселя:

$$S_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{\text{ср}})^2}.$$

Оцінку середньоквадратичного відхилення величини  $X_{\text{ср}}$  дістанемо за формулою

$$S_{\text{ср}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{\text{ср}})^2}.$$

Здобутий результат запишемо скорочено:

$$X_0 = X_{\text{ср}} \pm S_{\text{ср}}.$$

Вираз для коефіцієнта  $k$  апроксимуємо кубічною параболою:

$$k_i = a_1 p_i + a_2 p_i^2 + a_3 p_i^3, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

або докладніше:

$$k_1 = a_1 p_1 + a_2 p_1^2 + a_3 p_1^3,$$

$$k_2 = a_1 p_2 + a_2 p_2^2 + a_3 p_2^3,$$

$$k_3 = a_1 p_3 + a_2 p_3^2 + a_3 p_3^3.$$

Маючи значення  $K, P_1, P_2$  і  $P_3$ , розв'язуємо систему з трьома невідомими і знаходимо коефіцієнти  $a_1, a_2, a_3$ :

$$a_1 = 0,972 \cdot 10^{-2}; \quad a_2 = 0,506 \cdot 10^5; \quad a_3 = 0,694 \cdot 10^{-9}.$$

Підставивши коефіцієнти  $a_1, a_2, a_3$  у формулу (3), дістанемо вираз для розрахунку коефіцієнта пропорційності:

$$k = 0,972 \cdot 10^{-2} P - 0,506 \cdot 10^{-5} P^2 + 0,694 \cdot 10^{-9} P^3.$$

У результаті маємо залежність:

$$U_3 = k U_\phi = f(P) \cdot U_\phi.$$

Для перевірки правильності виконаних розрахунків обчислимо  $U_3$  для значень тиску аргону в пальнику, які відповідають тиску в проведених нами експериментальних дослідженнях із подальшою побудовою графіків розрахункових та експериментальних залежностей виду

$$U_3 = f(R).$$

Результати обчислень подаємо у вигляді табл. 5–8.

Таблиця 5

**Значення  $k, U_\phi$  і розрахункове значення  $U_3$  при  $R = 5,5$  мм**

$P, \text{Па}$	1330	1995	2660	3325	3390
$k$	5,59 ± 0,3	4,7 ± 0,2	3,1 ± 0,1	2,52 ± 0,1	2,31 ± 0,1
$U_\phi, \text{В}$	31,5	42,7	53,07	62,74	71,94
$U_3, \text{В}$	176 ± 9	203 ± 8	166 ± 5	158 ± 6	166 ± 7

Таблиця 6

**Значення  $k, U_\phi$  і розрахункове значення  $U_3$  при  $R = 10$  мм**

$P, \text{Па}$	1330	1995	2660	3325	3390
$k$	5,6 ± 0,3	4,7 ± 0,2	3,1 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,4 ± 0,1
$U_\phi, \text{В}$	30,7	41,6	51,7	61,1	70,2
$U_3, \text{В}$	171 ± 9	198 ± 8	162 ± 5	154 ± 6	162 ± 7

Таблиця 7

**Значення  $k, U_\phi$  і розрахункове значення  $U_3$  при  $R = 13$  мм**

$P, \text{Па}$	1330	1995	2660	3325	3390
$k$	5,6 ± 0,3	4,7 ± 0,2	3,1 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,3 ± 0,1
$U_\phi, \text{В}$	29,8	40,4	50,2	59,3	68
$U_3, \text{В}$	166 ± 9	192 ± 8	157 ± 5	149 ± 6	157 ± 7

Таблиця 8

**Значення  $k, U_\phi$  і розрахункове значення  $U_3$  при  $R = 14,5$  мм**

$P, \text{Па}$	1330	1995	2660	3325	3390
$k$	5,6 ± 0,3	4,7 ± 0,2	3,1 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,3 ± 0,1
$U_\phi, \text{В}$	29,4	39,8	49,5	58,5	67,1
$U_3, \text{В}$	164 ± 9	189 ± 8	155 ± 5	147 ± 6	150 ± 7

**Висновки**

◆ Графіки залежності  $U_3 = f(U_\Phi)$ , побудовані за розрахунковими даними показують, що розрахункові та експериментальні значення  $U_3$  у досліджуваних точках збігаються, тобто залежність  $U_3 = f(U_\Phi)$ , запропоновану нами для розрахунку  $U_\Phi$  за наявними даними, виведено правильно, тому надалі при будь-яких розрахунках відпадає потреба знаходити  $U_3$  — достатньо мати  $U_\Phi$ .

◆ Дослідження особливостей роботи плазмових пальників у різних режимах та оптимізація їх пускових характеристик виконується з метою забезпечення стабільності сигналів неконтрольованого випромінювання, що здійснюється з бортової системи зв'язку КА.

◆ При розробці нових типів плазмових пальників особлива увага приділяється енергоефективності, високим експлуатаційним характеристикам, простоті й надійності систем управління процесами пуску та роботи в різних режимах.

◆ Пропонується використовувати плазмові пальники для забезпечення надійного зв'язку КА при його пуску та проходженні щільних шарів атмосфери.

**Список використаної літератури**

1. **External Control of Plasmas for High-Speed Aerodynamics** / [S. Macheret, Y. Ionikh, Martinelli a. o.] // Paper AIAA 99-4853. 3rd WIG Workshop. Norfolk. VA. — Nov. 1999. — P. 16.

2. **Шульга, О. В.** Методологічні основи побудови псевдо-супутникової радіосистеми для підвищення безпеки управління компонентів мобільних мереж зв'язку: дис. ... доктора техн. наук / О. В. Шульга. — К., 2015. — 336 с.

3. **Райзер, Ю. П.** Фізика газового розряду / Ю. П. Райзер. — М.: Интеллект, 2009. — 736 с.

4. **Вдовин, В. Г.** Экспериментальное исследование физических условий в плазме разряда ВД в смеси паров ртути с добавками металлогалогенов TlJ, InJ3, NaJ: дис. ... канд. техн. наук / В. Г. Вдовин. — М., 1981. — 172 с.

5. **Управление процессом зажигания металлогалогенных ламп высокого давления** / [А. В. Шульга, Д. М. Нелюба, О. И. Данник, Е. В. Котюк] // Системы обработки информации. — Х.: ХУПС, 2012. — Т. 1. — Вып. №2 (100). — С. 108–111.

6. **Экспериментальные исследования зажигания металлогалогенных источников света в зависимости от различных факторов с целью создания систем управления работой навигационными приборами видимого спектра излучения** / [А. В. Шульга, О. А. Зубрицкий, Д. М. Нелюба, О. И. Данник] // Системы управления, навигации та зв'язку: зб. наук. праць. — П.: Полт. нац. техн. ун-т імені Ю. Кондратюка. — 2013. — Вып. №2 (26). — С. 54 – 57.

**Рецензент:** доктор техн. наук, професор **С. В. Козелков**, Державний університет телекомунікацій, Київ.

А. В. Шульга, А. В. Шефер, Д. М. Нелюба, М. Н. Гонтарь  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ  
 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Описан метод идентификации космических аппаратов (КА) по неконтролируемым излучениям (НКИ), который заключается в анализе излучения бортовой аппаратуры (БА) обнаруженного космического объекта (КО) и сопоставлении с математическими моделями идентифицируемых процессов, что позволит повысить качество функционирования системы контроля космического пространства. Данный метод не только обеспечит дополнительные сведения о работе бортовых аппаратов исследуемых КА, но и позволит классифицировать КО функционирующих КА по особенностям работы внутренних систем в пассивном режиме локации.

**Ключевые слова:** космический аппарат; плазма; бортовая система навигации и мобильной связи; плотность мощности; колебания гетеродина; динамическая модель; кусочно-линейная аппроксимация; радиотехническая станция.

O. Shulga, O. Shefer, D. Neliuba, M. Hontar  
**FEATURES RESEARCH OF PLASMA RADIATION SOURCES IN DIFFERENT MODES  
 FOR INCREASING SPACECRAFT INTERFERENCE PROTECTION**

In the article determined, that the power density distribution of the instability process is extremely difficult to estimate by direct measurements, because its components are small, in comparison with the power of the main frequency component. More accessible are measurements of time characteristics of frequency instability. Were described a method for identifying spacecraft (SC) by uncontrolled emissions (UE), which consists in analyzing the onboard equipment radiation of the detected space object (SO) and comparing it with mathematical models of the identified processes, what will improve the functioning quality of the space control system. This method will provide additional information about on-board apparatus (OBA) of spacecraft, and makes it possible to classify SO of functioning spacecraft according to the internal systems operation features in passive location mode.

**Keywords:** spacecraft; plasma; on-board navigation and mobile communication system; power density; fluctuation oscillator; dynamic model; piecewise linear approximation; radio engineering station.