УДК 621.002.56+537.87+629.76+519.816 https://doi.org/10.15407/itm2021.02.126

П. І. ЗАБОЛОТНИЙ, М. Б. ГОРЄВ, А. Д. ГРИШКЕВИЧ, В. М. МАМЧУК

ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДДІЛУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: ifk56@ukr.net

Наведено результати досліджень, що проводилися у відділі функціональних елементів систем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України на протязі останніх п’яти років. У результаті досліджень з мікрохвильових зондових методів вимірювань розроблено двозондовий варіант хвилевідної вимірювальної секцій для надвисокочастотного інтерферометра. Зменшення кількості зондів і можливість використання тільки двох зондів показано шляхом аналізу коренів рівняння, яке пов’язує модуль невідомого комплексного коефіцієнта відбиття зі струмами з’єднаних із зондами напівпровідникових детекторів. Розроблено методи підвищення точності вимірювань шляхом урахування коефіцієнта відбиття рупорної антени, зміни довжини зондувальної електромагнітної хвилі у відповідності з виміряним коефіцієнтом відбиття та компенсації похибки установки міжзондової відстані.

Приведено результати розробки і досліджень мікрохвильових вимірювачів параметрів іоносферної плазми. Розроблено и досліджено експериментальні і комп’ютерні моделі мікрохвильових вимірювачів параметрів плазми. Створена теоретична і експериментальна основа для розробки вимірювачів на основі біконічних резонаторів для оцінки концентрації електронів у розрядженій низькотемпературній плазмі.

Наведено результати розробки і досліджень експериментальних зразків іонно-плазмових, іонно-променевих і комбінованих технологічних пристроїв для проведення допоміжних і основних технологічних операцій поверхневого зміцнення, а також для комплексної зміцнюючої обробки в єдиному вакуумному циклі. Розроблено оригінальну схему імпульсного розрядного джерела. Досліджено робочі характеристики магнетронної системи в режимі генерації спрямованого потоку газових і металевих іонів. З метою фокусування іонного пучка модернізовано автономне іонне джерело з анодним шаром.

Приведено результати дослідження техніко-економічної та наукової ефективності складних технічних систем і об’єктів ракетно-космічної техніки. Зокрема, результати досліджень по удосконаленню існуючих методів розрахунку показників надійності і безпеки об’єктів ракетно-космічної техніки.

Ключові слова: *комплексний коефіцієнт відбиття, переміщення, електричний зонд, надвисокочастотна інтерферометрія, хвилевідна секція, розріджена плазма, плазмові технологічні пристрої, біконічний резонатор.*

This paper presents the results of investigations conducted at the Department for Functional Elements of Control Systems of the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine over the past five years. The investigations into microwave probe measurements resulted in a two-probe implementation of microwave interferometry for displacement measurement. The possibility of using as few as two probes was demonstrated by analyzing the roots of the equation that relates the magnitude of the unknown complex reflection coefficient to the currents of the semiconductor detectors connected to the probes. To improve the measurement accuracy, methods were developed to do this by accounting for the reflection coefficient of the horn antenna, by changing the operating wavelength according to the measured reflection coefficient, and by compensating the interprobe distance error.

The results of development and study of microwave meters of ionospheric plasma parameters are presented. Experimental and computer models of microwave meters of plasma parameters were developed and studied. An experimental and theoretical basis was prepared for the development of meters based on biconical cavities to assess the electron density in a rarefied low-temperature plasma.

The paper presents the results of development and study of prototype ion-plasma, ion-beam, and combined process devices for auxiliary and main surface strengthening operations and combined strengthening treatment in a single vacuum cycle. A novel circuit for a pulse discharge source was designed. The performance characteristics of a magnetron system were studied in the regime of generation of a directed gas and metal ion flow. To provide ion beam focusing, a self-contained anode-layer ion source was upgraded.

The paper presents the results of study of the technical-and-economic and scientific efficiency of complex engineering systems and rocket/space hardware, in particular the results on the refinement of existing methods for calculating rocket/space hardware reliability and safety indices.

Keywords: *complex reflection coefficient, displacement, electrical probe, microwave interferometry, waveguide section, rarefied plasma, plasma processing devices, biconical cavity.*

Розробка методів для інтерференційних зондових надвисокочастотних вимірювань переміщення. Вимірювання в надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні довжин хвиль широко використовуються для визначення різноманітних параметрів, таких як відстань, переміщення, швидкість, діелектрична проникність тощо. Для побудови вимірювачів руху є вельми привабливою зондова реалізація НВЧ-інтерферометрії. У результаті досліджень з зондових НВЧ-вимірювань, що проводилися у відділі функціональних елементів систем керування Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України на протязі останніх п’яти років, розроблено двозондовий метод вимірювання переміщення. Його характерною рисою є можливість вимірювання переміщення з використанням тільки двох зондів, на той час як загальновживаною практикою є використання трьох зондів. Теорію цього методу [1, 2] наведено нижче.

Розглянемо два зонди 1 і 2, з’єднані з напівпровідниковими детекторами з квадратичною вольт-амперною характеристикою. Зонди розташовані між випромінювачем і контрольованим об’єктом на відстані $\lambda_g/8$ один від одного, де λ_g – довжина зондувальної електромагнітної хвилі у хвилеводі. Ближче до об’єкта розташований зонд 2.

Струми детекторів J_1, J_2, нормовані на їхні значення в режимі узгодженого навантаження, таким чином виражаються через модуль R і фазу ψ комплексного коефіцієнта відбиття в місці розташування зонда 1

$$J_1 = 1 + R^2 + 2R\cos\psi\ , \qquad (1)$$

$$J_2 = 1 + R^2 + 2R\sin\psi\ . \qquad (2)$$

Інформація про відстань x між об’єктом і зондом 1 міститься у фазі комплексного коефіцієнта відбиття: $\psi = 4\pi x/\lambda + \phi$, де λ – довжина зондувальної електромагнітної хвилі у вільному просторі, ϕ – складова фази, яка не залежить від відстані x.

Задача полягає в тому, щоб знайти переміщення об’єкта $\Delta x(t)$ у момент часу t відносно його положення в початковий момент часу t_0. При визначенні переміщення для усунення фазової невизначеності достатньо мати квадратурні сигнали $\cos\psi$ и $\sin\psi$. Згідно з (1) і (2), ці сигнали таким чином виражаються через невідомий модуль коефіцієнта відбиття

$$\cos\psi = \frac{a_1 - R^2}{2R}, \qquad \sin\psi = \frac{a_2 - R^2}{2R},$$

де введено позначення $a_1 = J_1 - 1$, $a_2 = J_2 - 1$.

З виразів для квадратурних сигналів отримується біквадратне рівняння відносно R

$$R^4 - (a_1 + a_2 + 2)R^2 + \frac{a_1^2 + a_2^2}{2} = 0\ . \qquad (3)$$

Це рівняння має два додатні корені R_1 і R_2 ($R_1 \ge R_2$). Аналіз цих коренів показує, що у випадку $R \le 1/\sqrt{2}$ модуль коефіцієнта відбиття R завжди буде даватися коренем R_2. У цьому випадку модуль коефіцієнта відбиття однозначно визначається з рівняння (3) як його корінь R_2 і, отже, $\cos\psi$ і $\sin\psi$

також визначаються однозначно. При відомих $\cos\psi$ і $\sin\psi$ переміщення об'єкта Δx у момент часу t_n, $n = 0, 1, 2, ...$, відносно його початкового значення $x(t_0)$ можна знайти за допомогою такого алгоритму розгортання фази [3]

$$\varphi(t_n) = \begin{cases} \operatorname{arctg}\dfrac{\sin\psi(t_n)}{\cos\psi(t_n)}, & \sin\psi(t_n) \ge 0, \cos\psi(t_n) \ge 0, \\ \operatorname{arctg}\dfrac{\sin\psi(t_n)}{\cos\psi(t_n)} + \pi, & \cos\psi(t_n) < 0, \\ \operatorname{arctg}\dfrac{\sin\psi(t_n)}{\cos\psi(t_n)} + 2\pi, & \sin\psi(t_n) < 0, \cos\psi(t_n) \ge 0, \end{cases}$$

$$\Delta\varphi(t_n) = \varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1}),$$

$$\theta(t_n) = \begin{cases} 0, \ n = 0, \\ \theta(t_{n-1}) + \Delta\varphi(t_n), \quad |\Delta\varphi(t_n)| \le \pi, \quad n = 1, 2, ..., \\ \theta(t_{n-1}) + \Delta\varphi(t_n) - 2\pi\operatorname{sgn}[\Delta\varphi(t_n)], \ |\Delta\varphi(t_n)| > \pi, \ n = 1, 2, .., \end{cases}$$

$$\Delta x(t_n) = \frac{\lambda}{4\pi}\theta(t_n), \quad n = 0, 1, 2, ...,$$

де φ – нерозгорнута фаза, θ – розгорнута фаза.

У випадку ж $R > 1/\sqrt{2}$ переміщення також може бути визначене із задовільною точністю, якщо в якості модуля коефіцієнта відбиття використовувати корінь R_2. У цьому випадку максимальна теоретична похибка визначення переміщення складає близько 4,4 % від довжини зондувальної електромагнітної хвилі λ.

Для перевірки описаного вище двозондового методу визначення переміщення було виміряно переміщення об'єкта (металевий диск або металева квадратна пластина), який приводився до зворотно-поступального руху корбо-гонковим механізмом [4]. Довжина зондувальної електромагнітної хвилі у вільному просторі у всіх випадках складала 3 см.

В експерименті № 1 використовувався металевий диск діаметром 128 мм, подвійна амплітуда коливань складала 15 см, а мінімальна відстань між антеною й диском – 100 см. В експерименті № 2 використовувався такий же самий диск, подвійна амплітуда коливань складала 10 см, а мінімальна відстань між антеною й диском – 15 см. В експерименті № 3 використовувався металевий квадрат зі стороною 70 мм, подвійна амплітуда коливань складала 10 см, а мінімальна відстань між антеною й диском – 5 см.

На рис. 1 – рис. 3 наведено часову залежність виміряного переміщення об'єкта Δx і фактичного переміщення об'єкта Δx_{act}, часову залежність похибки визначення переміщення Δx_{er} і залежність кореня R_2 рівняння (3) (виміряного модуля коефіцієнта відбиття) від переміщення об'єкта Δx_0 з положення, найближчого до антени, для експериментів № 1, № 2 і № 3 відповідно. Як видно з рисунків, криві виміряного й фактичного переміщення співпадають з точністю до товщини ліній.

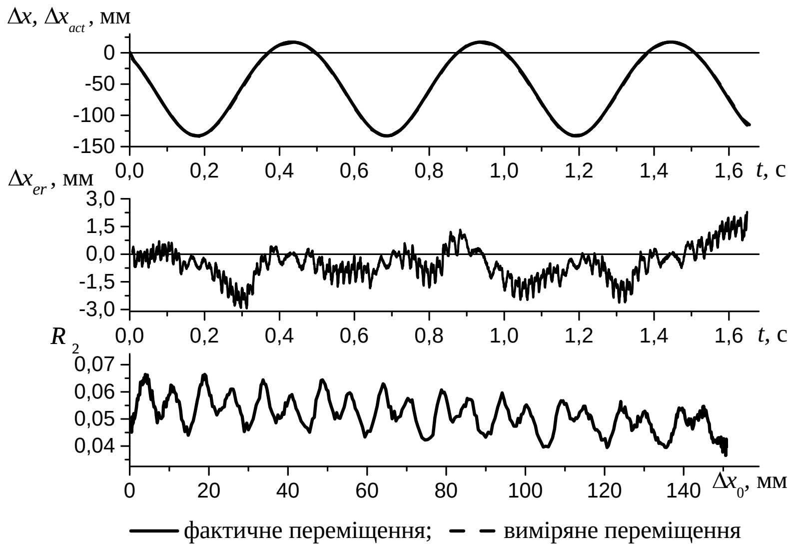


Рис. 1

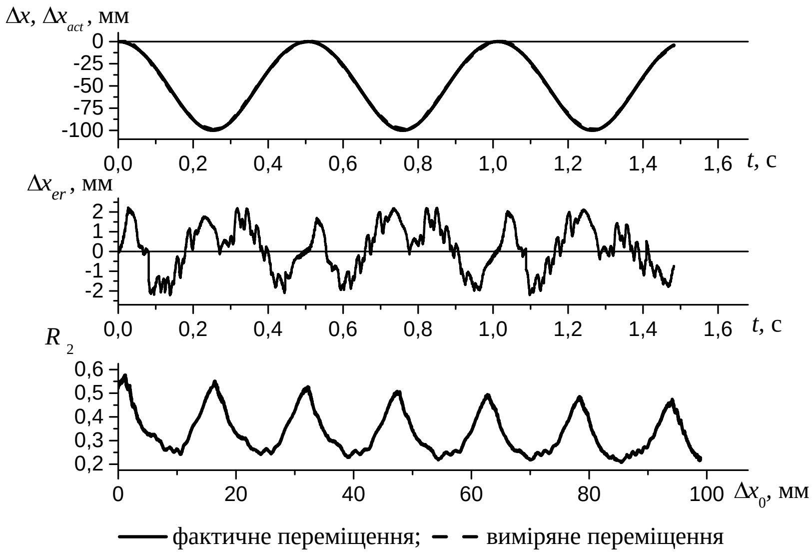


Рис. 2

Як видно з рис. 3 (експеримент № 3), розроблений метод добре працює й при мінімальній відстані до антени 5 см, та той час як радар на стійній хвилі, запропонований у роботі [5], не може працювати на відстанях, менших від 14 см, через інтерференцію між об’єктом й антеною.

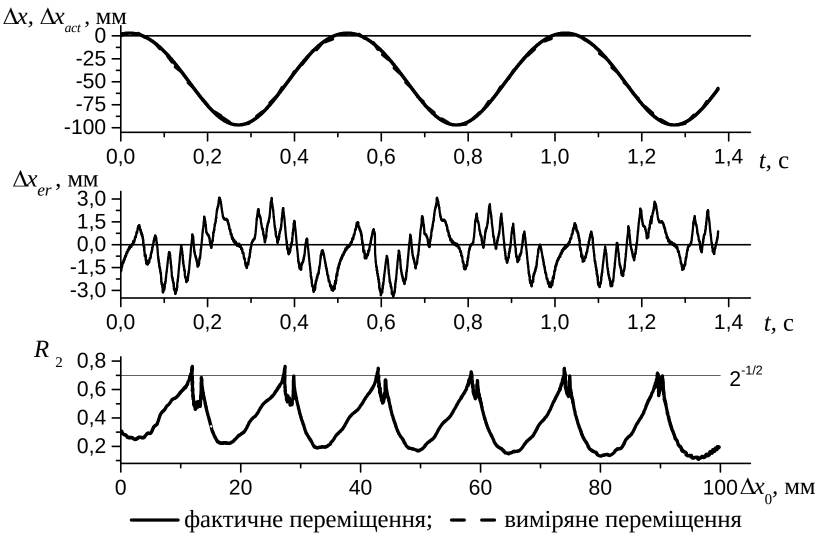


Рис. 3

В описаному вище методі нехтується наявністю у хвилевідній секції із зондами хвилі, відбитої від рупорної антени. Однак це нехтування може призводити до значної похибки у випадку, коли коефіцієнт відбиття об’єкта є порівняним з коефіцієнтом відбиття рупорної антени, що, наприклад, має місце при достатньо великій відстані між об’єктом й антеною.

Метод урахування коефіцієнта відбиття рупорної антени запропоновано в роботах [6, 7].

З урахуванням коефіцієнта відбиття рупорної антени вирази для квадратурних сигналів і рівняння для визначення невідомого модуля коефіцієнта відбиття об’єкта набувають вигляду

$$\sin\psi = \frac{A_2 - R^2}{2RB}, \quad \cos\psi = \frac{A_1 - R^2}{2RB},$$

$$R^4 - R^2\left(2B^2 + A_1 + A_2\right) + \frac{A_1^2 + A_2^2}{2} = 0, \qquad (4)$$

$$A_1 = a + bR_a \sin\psi_a, \; A_2 = a - b(1 + R_a \cos\psi_a),$$

$$B = 1 + \sqrt{2}R_a \sin\left(\psi_a + \frac{\pi}{4}\right),$$

$$a = J_1 - 1 - 2R_a \cos\psi_a - R_a^2, \quad b = J_1 - J_2 - 2R_a\left(\cos\psi_a - \sin\psi_a\right),$$

де R_a і ψ_a – модуль і фаза коефіцієнта відбиття рупорної антени.

Аналіз коренів біквадратного рівняння (4) показує, що у випадку $R \le B/\sqrt{2}$ модуль коефіцієнта відбиття об’єкта завжди буде даватися меншим додатним коренем R_2 цього рівняння. У випадку ж $R > B/\sqrt{2}$ при вимірюваннях у вільному просторі переміщення може бути з точністю до кількох процентів від довжини зондувальної електромагнітної хвилі у вільному просторі, якщо вважати, що модуль коефіцієнта відбиття об’єкта також дається коренем R_2.

На рис. 4 наведено часову залежність похибки визначення переміщення Δx_{er} для різних значень модуля коефіцієнта відбиття об'єкта R при моделюванні процесу вимірювання переміщення об'єкта, що здійснює гармонійні коливання з періодом T. Модуль коефіцієнта відбиття антени дорівнював 0,05, і відхилення струмів детекторів від їхніх теоретичних значень моделювалося випадковим шумом. Як видно з рисунка, при коефіцієнті відбиття об'єкта, порівняним з коефіцієнтом відбиття антени, нехтування останнім може призвести до значної похибки.

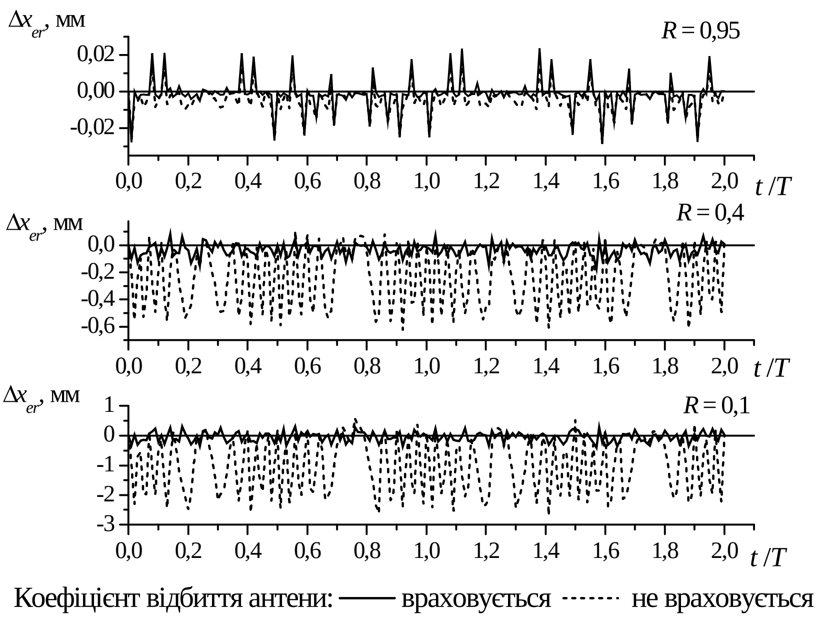


Рис. 4

У роботі [8] показано, що для зменшення похибки двозондових вимірювань у широкому діапазоні коефіцієнта відбиття об'єкта параметри двозондового вимірювача λ_0 (довжина зондувальної електромагнітної хвилі у вільному просторі, при якій міжзондова відстань становить $\lambda_g/8$) і W (розмір широкої стінки хвилевідної секції) двозондового вимірювача переміщення повинні задовольняти умові $1,3 \le \lambda_0/W \le 1,4$ і довжина зондувальної електромагнітної хвилі у вільному просторі повинна змінюватися з λ_0 на $1,1\lambda_0$ при виміряному коефіцієнті відбиття об'єкта вище від 0,514.

У роботі [9] запропоновано метод компенсації похибки визначення переміщення, пов'язаної з відхиленням міжзондової відстані від її установочного значення. На рис. 5 наведено результати моделювання процесу вимірювання переміщення, а саме похибку Δx_{er} визначення переміщення з використанням установочного значення міжзондової відстані ($\lambda_g/8$) та її уточненого значення ($0,1008\lambda_g$) при фактичній міжзондовій відстані $\lambda_g/10$.

Як видно з рисунка, використання уточненої міжзондової відстані значно зменшує похибку визначення переміщення. Описані вище методи можуть бути застосовані при розробці та виготовленні мікрохвильових вимірювачів переміщення.

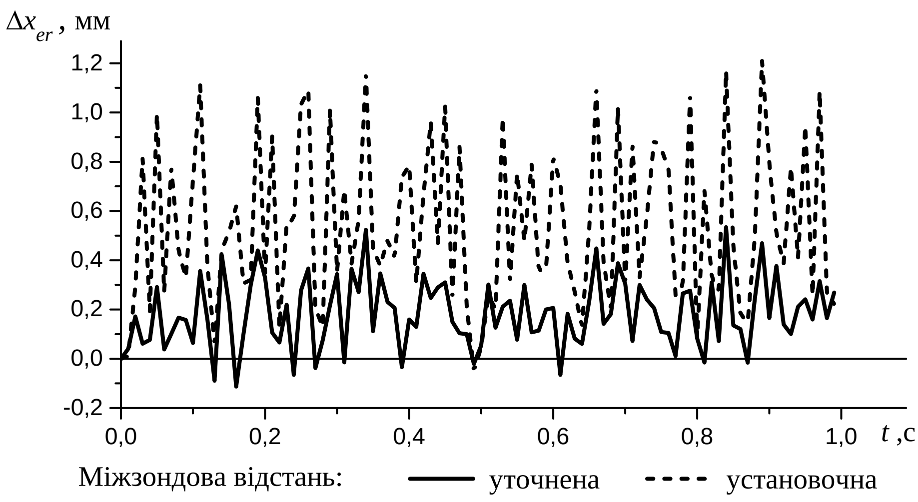


Рис. 5

Розробка і дослідження мікрохвильових вимірювачів параметрів іоносферної плазми. Основним завданням даного напрямку досліджень було розробка и дослідження моделей мікрохвильового резонаторного первинного перетворювача для вимірювання параметрів розрідженої іоносферної плазми.

В результаті досліджень було розроблено и досліджено декілька комп'ютерних моделей первинних перетворювачів на основі різних типів мікрохвильових резонаторів. Було показано, що найбільш перспективними для вимірювань параметрів розрідженої плазмі є первинні перетворювачі на основі біконічних резонаторів.

На основі комп'ютерних моделей біконічних резонаторів було отримано оцінки частотних залежностей коефіцієнтів передачі та відбиття між його портами від концентрації електронів в розрідженій плазмі.

Також на основі цих моделей було проведено дослідження впливу конструктивних особливостей (геометричних параметрів елементів, типу хвильових портів та матеріалів покриття внутрішніх порожнин резонатора) на його електродинамічні характеристики за умови відсутності впливу зовнішнього магнітного поля.

На основі аналітичних моделей було проведено дослідження залежності власних частот біконічного резонатора від концентрації електронів у плазмі. Було отримано оцінку залежності чутливості власних частот біконічного резонатора з різними геометричними параметрами до зміни параметрів плазми. Отримано вирази залежності чутливості зсуву і відносного зсуву власної частоти до зміни концентрації вільних електронів у однорідній іоносферній плазмі за відсутності магнітного поля:

$$\frac{\Delta f}{n_e} = \frac{e^2 r}{4\pi m_e \varepsilon_0 c f'(\Phi)\sin\Phi}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{n_e}\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{e^2 r^2}{2 m_e \varepsilon_0 c^2 f'^2(\Phi)\sin^2\Phi}, \quad (6)$$

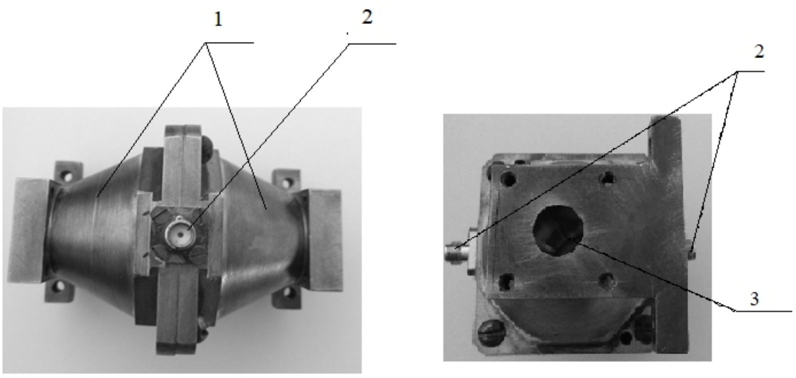
де Δf – зсув власної частоти; n_e – концентрація електронів у плазмі; e – заряд електрона; m_e – маса електрона; ε_0 – діелектрична стала; c – швидкість світла; r – довжина твірної конуса біконічного резонатора; Φ – напівкут при вершині конуса; f' – безрозмірна власна частота порожнього конічного резонатора, яка залежить від розміру півкута при вершині конусу.

З отриманих результатів було зроблено висновок, що для збільшення чутливості зсуву власної частоти біконічного резонатора до зміни концентрації електронів в ненамагніченій іоносферній плазмі належить збільшувати радіус основи конусів.

Для дослідження впливу магнітного поля на основі комп'ютерних моделей було отримано оцінки впливу параметрів потоку плазми на параметри біконічного резонатора в залежності від його розмірів і орієнтації вектора напруженості магнітного поля. Встановлено, що спостерігається практично повне співпадіння залежностей резонансних частот від n_e при різних значеннях кута орієнтації α відносно вектора напруженості магнітного поля Землі для висот від поверхні до 500 км. Більш детальна оцінка різниці Δf між резонансними частотами при різних значеннях кутів орієнтації α та однакових n_e показала значення порядку десятків кГц. Що при потребі отримання надто високоточних вимірювань параметрів іоносферної плазми можна використовувати при умові наявності в складі системи вимірювання високоточних генераторів збудження мікрохвильових резонаторів, детекторів частоти та термокомпенсаційних рішень.

У відповідності з результатами моделювання було розроблено і виготовлено експериментальний зразок первинного перетворювача на основі біконічного резонатора і проведено експериментальні дослідження його характеристик в нормальних умовах.

Експериментальний зразок приведено на рис. 6.



1 – конічні елементи корпусу резонатора; 2 – коаксіальний роз'єднувач (SMA); 3 – отвір для плазми

Рис. 6

Результати експериментальних досліджень параметрів біконічного вимірювача показали їх добре співпадіння з даними, отриманими при комп'ютерному і аналітичному моделюванні. Середнє квадратичне відхилення виміряних резонансних частот від отриманих при моделюванні не перевищувала 2 %.

Отримані результати можуть бути використані як теоретична і експериментальна основа для створення вимірювачів на основі біконічних резонаторів для оцінки концентрації електронів у розрідженій низькотемпературній плазмі.

Розробка та дослідження іонно-плазмових і іонно-променевих пристроїв для зміцнення робочих поверхонь пар тертя. Основними об'єктами досліджень за даною тематикою були робочі процеси в плазмових технологічних пристроях на основі розряду із замкненим дрейфом електронів [10]. Під час виконання цих досліджень вирішувались завдання: розробки методів і пристроїв форсування робочих процесів нанесення наноструктурних зміцнюючих покриттів; розробки джерела живлення потужнострумового імпульсного магнетронного розряду (ПІМР) для створення спрямованого потоку газо-металевої плазми; створення поліфункціональних плазмових технологічних пристроїв; створення автономного джерела спрямованого потоку енергетичних газових іонів; оптимізація процесів зміцнення поверхні однокомпонентним дифузійним і імплантаційним азотуванням.

Найбільш універсальним способом зміцнення поверхні є нанесення наноструктурних покриттів. З числа технологічних пристроїв для нанесення таких покриттів слід виділити магнетронну розпилювальну систему (МРС), яка здатна забезпечити отримання потоку матеріалу покриття не забрудненого мікрокраплинною складовою. Наноструктурування покриття в процесі його конденсації забезпечується низькоенергетичним асистуванням іонами аргону, які екстрагуються з магнетронного розряду. Реалізація цієї функції в МРС можлива тільки при забезпеченні незбалансованості магнітного поля МРС в області магнетронного розряду.

Одним із напрямів удосконалення МРС було створення умов для регулювання показника незбалансованості магнітного поля, що дозволяє в широких межах регулювати параметри потоку газових іонів на поверхню. Для удосконалення МРС нами було розроблено, виготовлено і випробувано [11] дві моделі планарної незбалансованої магнетронної системи – ПлНбМРС50 з регульованою незбалансованістю. Регулювання показника незбалансованості здійснювалося плавною або дискретною перебудовою параметрів магнітного поля. Середня густина струму в розряді МРС з катодом діаметром 50 мм становила 125 мА/см^2. Потужність розряду МРС до 3 кВт. Відмінними ознаками ПлНбМРС50, в порівнянні з прототипами, було зниження (до 0,07 Па) робочого тиску аргону і істотне (на 30 %) поліпшення коефіцієнта використання матеріалу катода.

Істотне підвищення якості покриття в МРС забезпечувалося підвищенням частки металевих іонів в потоці розпорошеного матеріалу шляхом використання режиму ПІМР. У такому режимі стало можливим істотне підвищення імпульсної потужності розпилення, що призводило до часткової (до 50 %) іонізації розпорошеного матеріалу.

Для забезпечення роботи ПІМР було розроблено [12] імпульсне низькочастотне джерело живлення магнетронного розряду з регульованою частотою від 2 Гц до 200 Гц. Основною відмінністю розробленого джерела від стандартних зразків є знижена частота проходження розрядних імпульсів при значно більшій їх тривалості (до 10 мс). Імпульсне низькочастотне джерело відрізняється дешевою і простою конструкцією, у порівнянні зі стандартними імпульсними джерелами на 0,1 кГц – 30 кГц.

Одночасне використання в МРС режиму ПІМР і системи регулювання показника незбалансованості дозволило реалізувати в ПлНбМРС50 режим генерації потоку чисто газової або газо-металевої плазми [12]. На граничних режимах МРС густина струму на катод досягає значення 0,4 А/см^2. Для забезпечення різних технологічних операцій іонної обробки поверхні були досліджені [13] можливості ПлНбМРС50 для генерування спрямованого потоку газових і (або) металевих іонів. У стаціонарному режимі роботи гранично незбалансованого ПлНбМРС50 генерується пучок газових іонів з кутом розходження 20 град.

В режимі імпульсно-періодичного розряду в ПлНбМРС50 формується вузький пучок газо-металевої плазми з розширенням на 10 град. Середня густина струму на поверхню, що була віддалена на 150 мм, становила 10 мА/см^2. Наявність металевих іонів в потоці матеріалу покриття істотно покращує можливості формування наноструктурного покриття з поліпшеними адгезійними характеристиками. У ряді випадків ПлНбМРС, що працює в імпульсному режимі, може розглядатися як універсальний іонно-плазмовий технологічний пристрій, здатний виконувати комплексну зміцнюючу обробку поверхні, що включає низькоенергетичне імплантаційне зміцнення або радіаційно-стимульоване азотування у розрідженій плазмі з наступним нанесенням наноструктурного покриття. Такі властивості ПлНбМРС50 відкривають можливості для поліпшення функціонально-експлуатаційних властивостей поверхневого зміцнення при одночасному підвищенні продуктивності обробки, завдяки універсальності робочих функцій технологічного пристрою.

В універсальному пристрої, як правило, обмежено можливості забезпечення граничних характеристик. Так в ряді випадків, наприклад при іонно-променевій модифікації поверхневих фізико-механічних властивостей пласких або вісесиметричних поверхонь значної протяжності, переваги має обробка високоенергетичним пучком з високою густиною іонного струму.

Для виконання форсованої іонно-променевої обробки була проведена модернізація автономного іонного джерела типу «прискорювач з анодним шаром» (ПАШ) [13]. Модернізація полягала в застосуванні балістичного фокусування іонного пучка з наступним його «дофокусуванням» в магнітній лінзі. Пучок газових іонів фокусувався на ділянці поверхні діаметром 40 мм, що знаходиться на відстані 150 мм від зрізу магнітної системи іонного джерела. Густина іонного струму в фокусі становила від 5 мА/см^2 до 15 мА/см^2. Енергія прискорених іонів дорівнювала приблизно половині розрядної різниці потенціалів в ПАШ. Завдяки незначному поліпшенню схеми підключення ПАШ була істотно поліпшена стійкість прискорювального режиму щодо високовольтних пробоїв. Автономне іонне джерело ПАШ125 орієнтовано на застосування при іонно-променевому низькоенергетичному азотуванні і для інтенсивної іонної обробки поверхні з метою знищення дефектного поверхневого шару. Дефектний шар виникає після абразивної обробки прецензійної поверхні і погіршує втомні характеристики пари тертя.

Для зміцнюючої обробки поверхонь з розвиненим 3D рельєфом використовується імерсійна плазмова технологія, тобто технологія модифікації властивостей поверхневого шару конструкційного металу із зануренням об’єкта обробки в однорідну об’ємну розріджену плазму.

При проведені азотування в режимі радіаційно-стимульованої дифузії необхідне суттєве підвищення енергії газових іонів. В промислових установках дифузійного азотуванні в тліючому розряді відсутні можливості для такого підвищення. Необхідною умовою для цього є збільшення протяжності катодного падіння тліючого розряду, що вимагає зниження тиску газу в реакційній камері до значень, при яких тліючий розряд стає несамостійним і вимагає додаткового ініціювання. Відомо, що для ініціювання несамостійного тліючого розряду може бути використано автономне джерело плазми (або джерело електронів), що генерує потік електронів з енергією більше 5 еВ. Було показано, що в потоці газо-металевої плазми, що генерується ПлНбМРС50, температура електронів досягає значення, необхідного для ініціювання несамостійного тліючого розряду.

На базі ПлНбМРС50 було розроблено конструкцію універсального джерела заряджених частинок з радіальною екстракцією енергетичних електронів з пучка газо-металевої плазми [14]. Для екстракції електронів використано принцип гратової стабілізації циліндричної поверхні емітера електронів. Було запропоновано конструкцію універсального технологічного плазмового пристрою для модернізації промислової вакуумно-плазмової установки Булат-3 з метою групової обробки дрібних деталей об'ємної конфігурації іонним азотуванням з подальшим нанесенням зносостійкого наноструктурного покриття.

Розроблені і модернізовані іонно-плазмові технологічні пристрої [15, 16] було запропоновано для модернізації промислових вакуумно-плазмових установок для зміцнюючої обробки елементів конструкції пар тертя значної (до 500 мм) протяжності, що мають внутрішні і зовнішні робочі поверхні діаметром від 50 мм до 150 мм.

Дослідження техніко-економічної та наукової ефективності складних технічних систем і об'єктів ракетно-космічної техніки. Одним із завдань даного напрямку робіт є удосконалення існуючих методів розрахунку показників надійності і безпеки об'єктів ракетно-космічної техніки [17 – 18]. Для вирішення цієї задачі було розроблено методику нормування надійності структурно-складних технічних систем, що забезпечує виконання вимог безпеки, облік економічних і технічних обмежень в умовах нечисленності статистичних даних. Зазначена методика включає математичні моделі, методи та алгоритми оптимізації надійності елементів ракет-носіїв і гамма-відсоткових термінів активного існування космічних апаратів, що дозволяє вирішити проблему великої розмірності та редукувати вихідну задачу, спростити розрахунок показників надійності і безпеки при проєктуванні високонадійних технічних систем.

При оцінюванні ефективності технічних систем використовувалися два підходи: з використанням принципу гарантованого результату [19] та на основі моделей нечітких даних з урахуванням кількісних і якісних показників [20]. Використовуючи алгоритм Мамдані [21], на першому етапі проводиться формування структури бази знань, а на другому етапі здійснюється параметрична ідентифікація залежності, що досліджується шляхом знаходження таких параметрів нечіткої бази знань, які мінімізують відхилення модельних та експериментальних даних. Запропоновані методи дозволяють врахувати інформацію про всі фактори, що впливають на ефективність, незалежно від виду та точності їх представлення, а також значно скорочують обсяги точної інформації, необхідної для прийняття оптимальних рішень.

В розвиток технологій щодо видалення космічного сміття з навколоземних орбіт [22] розроблено метод проєктування аеродинамічних систем відведення космічних апаратів, заснований на теорії прийняття рішень і використанні експертних, вербальних та аксіоматичних методів оцінювання ефективності систем [23]. Запропонований метод використовує алгоритми і процедури багатокритеріального оцінювання альтернатив, чим суттєво відрізняється від традиційних методів проєктування засобів відведення космічних апаратів. Основними результатами цього дослідження є структурування і критеріально-цільове моделювання задачі проєктування системи відведення космічних апаратів, розробка багатоетапної процедури оптимізації основних проєктних параметрів у вигляді логічної впорядкованої послідовності неформальних і формальних процедур, що дозволяє на початковій стадії проєктування підвищити ефективність і формалізувати процес генерації найбільш раціональних конструкторських рішень.

Необхідною умовою сталого розвитку космічної галузі України є ефективне управління діяльністю її підприємств і організацій та раціональне використання виділених коштів. Найбільш дієвим способом управління космічною галуззю є розробка державних науково-технічних програм [23]. Тому надзвичайно важливою є задача розробки методичного та інформаційно-аналітичного забезпечення з визначення ефективності і пріоритетності проєктів для підтримки процесів прийняття рішень при формуванні державних програм космічних досліджень.

Перспективним напрямком розвитку алгоритмів прийняття оптимальних рішень вважається комплексування процедур експертного, евристичного, аксіоматичного і вербального підходів, а також формалізація способів оцінювання альтернатив [23].

Виходячи з цього, розроблено декілька методів полікритеріального оцінювання альтернатив шляхом удосконалення процедур побудови нормованих і ненормованих функцій ефективності та модифікації класичних алгоритмів спільного шкалювання критеріїв.

Для отримання достовірних результатів в процесі рішення практичних задач надано рекомендації щодо належного використання розробленого методичного забезпечення. Виконання цих рекомендацій є гарантією адекватності математичної моделі і коректності застосування того чи іншого методу. Обґрунтовано необхідність створення єдиної автоматизованої інформаційно-аналітичної системи для конкурсного відбору проєктів і формування складу програм науково-технічних досліджень.

1. *Pylypenko O. V., Gorev N. B., Doronin A. V., Kodzhespirova I. F.* Phase ambiguity resolution in relative displacement measurement by microwave interferometry. Технічна механіка. 2017. № 2. С. 3–11. https://doi.org/10.15407/itm2017.02.003
2. *Pylypenko O. V., Doronin A. V., Gorev N. B., Kodzhespirova I. F.* Two-probe implementation of microwave interferometry for motion sensing and complex reflection coefficient measurement. Технічна механіка. 2018. № 3. С. 138–150. https://doi.org/10.15407/itm2018.03.138
3. *Silvia M. T., Robinson E. A.* Deconvolution of Geophysical Time Series in the Exploration for Oil and Natural Gas. Amsterdam–Oxford–New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979. 447 pp.
4. *Pylypenko O. V., Doronin A. V., Gorev N. B., Kodzhespirova I. F.* Experimental verification of a two-prove implementation of microwave interferometry for displacement measurement. Технічна механіка. 2018. № 1. С. 5–12. https://doi.org/10.15407/itm2018.01.005
5. *Okubo Y., Uebo T.* Experimental verification of measurement principle in standing wave radar capable of measuring distances down to zero meters. Electronics and Communication in Japan. Part 1. 2007. V. 90. No. 9. Pp. 25–33. https://doi.org/10.1002/ecja.20375
6. *Pylypenko O. V., Doronin A. V., Gorev N. B., Kodzhespirova I. F.* Analysis of the possibility of accounting for the antenna reflection coefficient in displacement measurements by probe methods. Технічна механіка. 2019. № 1. С. 85–93. https://doi.org/10.15407/itm2019.01.085
7. *Pylypenko O. V., Doronin A. V., Gorev N. B., Kodzhespirova I. F.* Two-probe measurements of the displacement of an object with account for the antenna reflection coefficient. Технічна механіка. 2019. № 3. С. 88–97. https://doi.org/10.15407/itm2019.03.088
8. *Pylypenko O. V., Doronin A. V., Gorev N. B., Kodzhespirova I. F.* Two-probe measurements of the displacement of mechanical objects over a wide range of the reflection coefficient. Технічна механіка. 2020. № 2. С. 89–98. https://doi.org/10.15407/itm2020.02.089

9. *Pylypenko O. V., Doronin A. V., Gorev N. B., Kodzhespirova I. F.* Interprobe distance error compensation in probe measurements of mechanical displacement. Технічна механіка. 2021. № 1. С. 77–83. https://doi.org/10.15407/itm2021.01.077
10. *Гришкевич А. Д., Гринюк С. И.* Технологические плазменные устройства на основе разряда с замкнутым дрейфом электронов. Разработка и применение. Техническая механика. 2013. № 3. С. 43–57.
11. *Гришкевич А. Д., Гринюк С. И.* Применение магнетронных устройств для комплексной плазменно-иммерсионной обработки поверхности. Технічна механіка. 2019. № 3. С.98–110. https://doi.org/10.15407/itm2019.03.098
12. *Гришкевич А. Д., Гринюк С. И.* Магнетронное формирование и применение интенсивных потоков газометаллической плазмы. Технічна механіка. 2019. № 2. С. 102–112. https://doi.org/10.15407/itm2019.02.102
13. *Гришкевич А. Д., Гринюк С. И.* Разработка и исследование макета низкочастотного источника питания сильноточного импульсного магнетронного разряда. Технічна механіка. 2019. № 4. С. 137–147. https://doi.org/10.15407/itm2019.04.137
14. *Гришкевич А. Д., Гринюк С. И.* Разработка плазменных технологических устройств для комбинированной технологии упрочнения деталей. Технічна механіка. 2017. № 4. С. 96–110. https://doi.org/10.15407/itm2017.04.096
15. *Гришкевич А. Д.* Разработка комбинированной технологии упрочнения деталей. Технічна механіка. 2017. № 3. С. 100–114. https://doi.org/10.15407/itm2017.03.100
16. *Гришкевич А. Д., Гринюк С. И., Антонюк С. Л.* Получение и свойства магнетронного хромового покрытия на рабочих поверхностях силового титанового гидроцилиндра. Техническая механика. 2014. № 3 С. 100–113.
17. *Конюхов С. Н., Федякин А. И.* Вероятностно-статистические методы проектирования систем космической техники. Днепропетровск: ИТМ НАН Украины и НКА Украины, 1997. 250 с.
18. *Мамчук В. М., Савоник О. М., Жукова Л. Г.* Об одном подходе к определению параметров космической техники. Техническая механика. 2013. № 1. С. 96–102.
19. *Гермейер Ю. Б.* Исследование операций. Методологические аспекты. Москва: Наука. 1972. 135 с.
20. *Ротштейн А. П.* Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. 320 с.
21. *Леоненков А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург. 2003. 736 с.
22. *Алпатов А. П., Басс В. П., Баулин С. А., Бразинский В. И., Гусынин В. П., Даниев Ю. Ф., Засуха С. А.* Техногенное засорение околоземного космического пространства. Днепропетровск: Пороги. 2012. 380 с.
23. *Мамчук В. М.* Определение приоритетности научно-технических проектов с помощью алгоритма шкалирования критериев. Технічна механіка. 2020. № 1. С. 91–105. https://doi.org/10.15407/itm2020.01.091

Отримано 02.06.2021,
в остаточному варіанті 08.06.2021