

## СУЧАСНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ ЗАВАДОСТІЙКОГО ЗВ'ЯЗКУ ПІД ЧАС ВЗАЄМОДІЇ РАДІОХВИЛЬ ІЗ ІОНІЗОВАНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

*Анотація:* У статті розглянуті особливості і переваги використання штучного плазмового середовища з метою компенсації зовнішньої плазмової оболонки, що підвищить завадостійкість зв'язку. Встановлено загальну фізичну закономірність взаємодії елементарних частинок в плазмі. Встановлено, що створення завадостійкого середовища залежить від енергії швидких електронів, позитивних іонів, швидких нейтральних частинок, метастабільних атомів та фотонів.

**Ключові слова:** завадостійкість, зв'язок, електромагнітні коливання, радіосигнал, іонізоване середовище, квазінейтральна плазма.

**Постановка проблеми.** З метою створення завадостійких телекомунікацій, проводиться аналіз плазмового середовища, котре утворюється навколо космічного апарата (КА) під час його руху із гіпершвидкістю. Новітні технології змінили ідеологію побудови завадостійких систем радіозв'язку, зробили можливим застосування досконалих інструментів, котрі покращують та здешевлюють підтримку функціонування зв'язку, і водночас відкривають практично невичерпні можливості супутникових телекомунікацій КА.

Іонізоване плазмове середовище створює частотно-селективну зону, не проникну для електромагнітних коливань радіодіапазону. Як наслідок, відсутня зворотна інформація від об'єкта керування - КА та унеможливлення передачі керуючих команд на нього, що призводить до знижується безпека руху об'єкта. Тому забезпечення якісного, а саме головного, безперервного зв'язку, є нагальною проблемою.

**Аналіз попередніх досліджень.** Останнім часом досягнуто помітний прогрес у вивченні неврівноважених станів плазмового середовища, що оточує КА [1, 2]. Квазінейтральна плазма містить заряджені (позитивні іони та негативні електрони) та нейтральні частинки, оскільки ці частинки рухомі, плазма може проводити електричний струм. Для недопущення втрати зв'язку із КА, науковцями запропоновано кілька підходів [2]. Наприклад, антени із тепловим захистом, конструкція котрих володіє зниженою чутливістю своєї радіопрозорості до взаємодії із іонізованим газом аеродинамічного нагріву. Або використання довгих теплостійких антен, котрі виносяться за плівку плазмової оболонки.

Дані підходи, направлені на покращення завадостійкості проходження радіосигналу, але вони суттєво погіршують аеродинаміку рухомого об'єкта. При цьому у доступних джерелах не наводиться інформація про створення завадостійкого середовища без погіршення аеродинаміки КА та енергоефективних методів впливу на плазмову оболонку.

**Мета статті.** Визначення основних закономірностей взаємодії радіосигналів із плазмою іонізованого газу для подальшого створення завадостійкого радіоканалу зв'язку.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для детального вивчення властивостей плазми необхідні дослідження фізичних процесів, що призводять до створення плазмового середовища з новими властивостями [3]. Результати досліджень [4] тліючого розряду дозволяють обґрунтовано зробити висновок про те що, механізм елементарних процесів катодної області повністю забезпечує самостійне існування всього тліючого розряду.

Під впливом позитивних іонів, що потрапляють на КА із великою енергією та швидких нейтральних атомів, котрі створюються в процесі перезаряджання іонів, на поверхні виникає велика вторинна електронна емісія. Ефект розряду плазми пояснюється коливальними рухами електронів, що пронизують плазму. Потік швидких електронів із одного темного простору

досягає, через плазму подвійного випромінювання, протилежного такого простору. Потім зупиняється, повертає до його поля зворотно і повертається в перший темний простір [4].

Результатом таких багатократних зворотно-поступальних рухів електронів є збільшення їх іонізуючої та збуджуючої здатності, котра призводить до підвищення щільності струму та збільшення напруженості електричного поля, в результаті чого створюються умови для вторинного підсилення струму [3, 4].

Деякі дослідники, із метою створення завадостійкого радіоканалу зв'язку, пропонують підсилення сигналу, котре може бути створене резонансом, або узгодженими електромагнітними коливаннями, між плазмовою оболонкою, спеціально створеним узгоджувальним шаром та КА. Вони пропонують додати цей шар для створення необхідних умов резонансу під час руху на гіпершвидкості. Вважають, що узгоджувальний шар буде виконувати функції конденсатора, як у звичайному електричному колі. Плазмова оболонка, з іншого боку, буде діяти як котушка індуктивності, котра запобігає зміні електричного струму, що проходить через неї. Коли конденсатор та котушка індуктивності з'єднані, вони можуть утворити резонансний контур.

Як тільки резонанс буде досягнуто, енергія почне стійко циркулювати між плазмою та штучно створеним узгоджувальним шаром, аналогічно до звичайних конденсатора та котушки в електричному колі. Як результат, радіосигнал що надходить із пристрою радіолокації може розповсюджуватись через узгоджувальний шар та плазмову оболонку безперешкодно.

Але для ефективної роботи цього підходу товщина узгоджувального шару і плазмової оболонки повинна бути меншою, ніж довжина електромагнітних хвиль, котрі використовуються для комунікації із КА.

Запропонований метод не буде працювати, якщо частотний діапазон антен буде занадто високим, що має місце в даний час. Тому даний метод практичного застосування не отримав.

Перспективним методом створення завадостійкого зв'язку є вплив на плазмову оболонку із середини КА. Це можливо шляхом взаємодії елементарних частинок плазми із штучно створеним джерелом елементарних процесів.

Тліючий розряд, за зовнішнім виглядом, являє собою короткий розряд, у випадку, коли анод знаходиться на відстані від катоду, котра не перевищує товщину темного фарадеевого простору, за умови відповідного тиску газу.

Плазма від'ємного випромінювання локалізована в катодній області тліючого розряду між кружковим та фарадеевим темним простором. Порівняно з плазмою позитивного стовпа дана плазма має значно менші розміри, в наслідок чого ця область розряду тривалий час мало приваблювала увагу дослідників та ще менше мала практичного використання. Однак, як показали дослідження за останні роки [3, 4], плазма від'ємного випромінювання за своїми параметрами має ряд переваг порівняно з плазмою позитивного стовпа, таких, як висока інтенсивність випромінювання, малий питомий енерговнесок та інше. Вона відіграє важливу роль у створенні нових зарядоносіїв та забезпечує стаціонарність розряду. Просторова однорідність плазми від'ємного випромінювання, котра створена циліндричною системою пучкових електронів, дозволяє проводити в оптимальних умовах вивчення процесів збудження, іонізації, рекомбінації та визначення фізичних констант у цих процесах. Створює підґрунтя для формування функції розподілу електронів за енергіями. Дозволяє створювати просторово однорідну іонізацію в перетворювачах енергії.

Штучно створена плазма просто утворюється в зонах позитивного стовпа та від'ємного випромінювання тліючого розряду [5]. Згідно з [6], плазма від'ємного випромінювання за інтенсивністю в 3 - 4 рази вище випромінювання плазми позитивного стовпа, а енерговитрати на її створення у таку ж кількість разів менші, ніж на створення позитивного випромінювання.

На основі досліджень [7] можна зробити висновок, що в результаті незначної середньої енергії та достатньо високої концентрації повільних електронів основну роль відіграє взаємодія електронів.

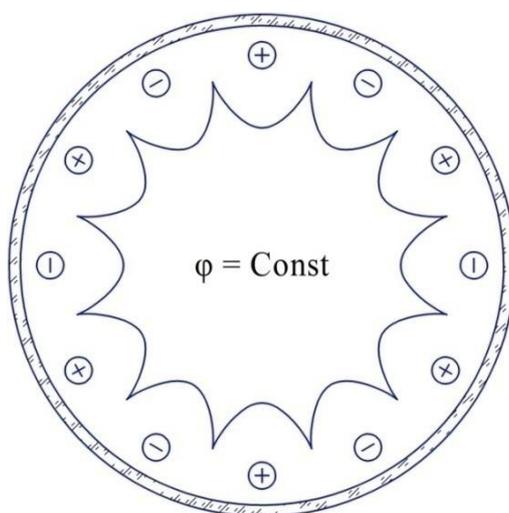
В усталеному розряді єдиною областю світіння є від'ємне випромінювання, що симетрично розташоване в середині.

Катодне падіння в розряді з порожнистим катодом є більш крутим, оскільки за умови високого його падіння, темний круковий простір має меншу довжину. Це призводить до того, що напруженість електричного поля має більшу величину. В такому електричному полі електрони та іони набирають велику кінетичну енергію, котру витрачають у від'ємному випромінюванні на іонізацію та збудження нейтральних атомів, рис.1. Також, нейтральні частинки газу збуджуються під дією атомів катодного матеріалу та його іонів.

Згідно з [8], у спектрі випромінювання плазми від'ємного випромінювання є велика кількість іскрових ліній. Найбільша інтенсивність плазми зосереджується на її осі, в той час як у плазмі від'ємного випромінювання з плоским катодом найбільша інтенсивність розташована на межі з темним круковим простором.

Під впливом позитивних іонів, що потрапляють на катод із великою енергією та швидких нейтральних атомів, котрі створюються в процесі перезаряджання іонів, на поверхні катода виникає велика вторинна електронна емісія. Інтенсивне випромінювання з плазми також вносить суттєвий внесок до вторинної електронної емісії.

На основі цього в розряді спостерігається значно менша напруга горіння, ніж у аномального катодного падіння потенціалу в розряді з порожнистим катодом.



*Рисунок 1 - Геометрія електростатичного поля штучно створеної плазми:  
+ стрижневі аноди; - стрижневі катоди*

Для створення ефективності плазми важливий не коливальний рух електронів, а злиття від'ємних випромінювань. В цьому випадку доля метастабільних атомів, іонів та фотонів, що надходять із плазми від'ємного випромінювання на катод, значно зростає.

Навколо антени КА генерується плазма від'ємного випромінювання, котра відштовхує іонізований зовнішній потік плазми, тим самим створює радіопрозоре середовище. Це відбувається без втручання у зовнішню конструкцію КА, а залежить від геометрії плазмових електродів, тиску та роду газу.

Дослідження проблем катодної області в короткому тліючому розряді є далеко незавершеним. Тліючий розряд має просторову неоднорідність, котра обумовлена наявністю достатньо великого числа розрядних зон між електродами та амбіполярної дифузії. В кожній із цих зон переважає один із кількох елементарних процесів.

**Висновки.** Побудова системи підвищеної завадостійкості радіосигналів при проходженні частотно-селективного середовища завмирання гіпершвидкісним КА, із застосуванням штучно створеної плазми, забезпечить підвищення безпеки радіозв'язку із об'єктом без погіршення аеродинамічних властивостей та додаткових витрат на перетворення сигналів телеметрії.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wolverson M. Piercing the Plasma: Ideas to Beat the Communications Blackout of Reentry. Scientific American. New York: Scientific American. 2009. no. 12. pp. 28–29.
2. Macheret S., Ionikh Y., Martinelli. and et. al. External Control of Plasmas for High -Speed Aerodynamics. Paper AIAA 99- 4853. 3rd WIG Workshop. Norfolk. VA. Nov. 1999, P. 16.
3. Smirnov Boris M. Theory of Gas Discharge Plasma. Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Switzerland. – 2015. – P 423.
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Москва :Интеллект, 2009. – 736 с.
5. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В. Л. Грановский. – Москва: Наука, 1971.– 543 с.
6. Wilhelm J., Kind W. // Beitr. Plasmaphysik v.5, p. 395,1965.
7. Hantzsche E., Popescu I., Lova I. Ann. d. Physik, 1969, 5, p. 308.
8. Rohatgi Vijay K. Electronic and Ionic Current at the Cathode of a Hollow Cathode Discharge. Journal of Applied Physics, 32, 1173 (1981).

**О. В. Шефер**

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

### **СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ СВЯЗИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАДИОВОЛН С ИОНИЗИРОВАННОЙ СРЕДОЙ**

*Аннотация:* В статье рассмотрены особенности и преимущества использования искусственной плазменной среды с целью компенсации внешней плазменной оболочки, что повысит помехоустойчивость связи. Установлена общая физическая закономерность взаимодействия элементарных частиц в плазме. Установлено, что создание помехоустойчивой среды зависит от энергии быстрых электронов, положительных ионов, быстрых нейтральных частиц, метастабильных атомов и фотонов.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость, связь, электромагнитные колебания, радиосигнал, ионизированная среда, квазинейтральная плазма.

**O. V. Shefer**

Poltava National technical Yuri Kondratyuk University

### **THE MODERN ASPECTS OF NOISE IMMUNE COMMUNICATION CONSTRUCTION DURING THE RADIO WAVES INTERACTION WITH THE IONIZED ENVIRONMENT**

*Annotation:* In article peculiarities and advantages of artificial plasma environment using the for the purpose of an external plasma cover compensation are considered. It will raise noise immunity of communication. The general physical consistent pattern of elementary particles interaction in the plasma is determined. It is established that the creation of noise immunity environment depends on energy of fast electrons, positive ions, fast of neutral particles, metastable atoms and photons.

**Keywords:** noise immunity, communication, electromagnetic oscillations, radio signal, ionized environment, quasinneutral plasma