

ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені Олеся ГОНЧАРА

## СТВОРЕННЯ АНТЕННО-ФІДЕРНИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

### РЕФЕРАТ

#### Вступ

*Висунута на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки робота «Створення антенно-фідерних пристройів для космічної техніки» відображає досягнення українських вчених і спеціалістів у галузі вітчизняної науки і техніки по створенню бортових антенно-фідерних пристройів космічних апаратів та приземних антенно-фідерних пристройів для забезпечення випробування бортової радіоапаратури космічних апаратів як на технічній так і на стартової позиціях. Робота містить опис науково-технічних та інженерних проблем, які розв'язано під час її виконання з метою забезпечення завдань Національної космічної програми України.*

У період становлення України як незалежної держави, починаючи з 1991 року і до цього часу, та не зважаючи на мінімальні обсяги державного фінансування було проведено значну роботу зі створення математичного апарату, засобів та методів виробництва, дослідження та випробування антенно-фідерних пристройів (АФП) і антенних решіток (АР) для космічної техніки. В Дніпропетровському національному університеті імені Олеся Гончара (ДНУ) наказами Ректора у 1991, 1995 роках було засновано науково-дослідну лабораторію радіотехнічних пристройів та систем, а для наближення результатів досліджень фахівців ДНУ до виробництва, між університетом та Державним Конструкторським Бюро «Південне» імені М.К. Янгеля (ДКБ «Південне», м. Дніпро) виконувались сумісні роботи в рамках договорів про науково-технічне співробітництво. Також по даної темі тривало співробітництво ДНУ з Харківським національним університетом радіоелектроніки (м. Харків) та Центральним науково-дослідним інститутом озброєння та військової техніки Збройних Сил України (м. Київ), що дозволило підвищити якість АФП та АР для космічних апаратів (КА), які розробляють та виготовляють в Україні та їх приземного випробування. Математичний апарат та ряд методів розробки АФП, які створено фахівцями Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, Державного

Конструкторського Бюро «Південне» імені М.К. Янгеля (ДКБ «Південне», Харківського національного університету радіоелектроніки та Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України, і запропоновані засоби та методи розробки, дослідження та випробування бортових та приземних АФП КА були впроваджені на ряді українських космічних апаратів.

### **Мета роботи**

Метою роботи є створення для космічної техніки АФП і АР нового покоління надзвичайно високих частот (НВЧ) з мінімально можливими габаритами та масою, з розширеним робочим частотним діапазоном, з можливістю корегування їх діаграмами направленості (ДН).

Для реалізації цієї мети було вирішено такі задачі:

- досліджено особливості розв'язку інтегральних рівнянь (ІР) відносно розподілу комплексного струму на лінійних довільно зігнутих тонких штирьових і петлевих антенах з довільною кількістю зосереджених комплексних та реактивних навантажень і вузлів збудження за допомогою розробленого розрахункового алгоритму і комп'ютерної програми;
- розроблено новий метод розрахунків і створення двочастотних антен з шунтами та реактивними вставками;
- розроблено метод обчислення вкладу реактивного електромагнітного поля (ЕМП) переходу коаксіальної фідерної лінії до електрично малої дротової антени, що ґрунтуються на розв'язку ІР відносно розподілу компонент ЕМП на виході фідера, яке сформовано з використанням тензорних функцій Гріна рівнянь Максвела для циліндричних областей;
- суттєво удосконалено метод визначення електричних параметрів АР з урахуванням взаємовпливу між їх антенами;
- створено нові методи розрахунків АР решіток з цифровим управлінням для космічної техніки, що перевершують кращі вітчизняні та зарубіжні аналоги;
- виконано моделювання та розрахунки електричних параметрів нових перспективних антен та АР для космічної техніки.

### **Наукова новизна та практична значимість**

В процесі розробки антен і антенних систем нового покоління НВЧ діапазону для космічної техніки було застосовано такі наукові підходи і одержані нові технічні рішення:

- запропоновано метод структурно-параметричної оптимізації строгої і наближеного аналізу малогабаритних (електричне малих) антен з включенням у випромінюючі гілки зосереджених індуктивних і ємнісних

навантажень;

- при розрахунках параметрів АФП для космічної техніки вперше застосований до вирішення ІР метод регуляризації матриці коефіцієнтів системи лінійних рівнянь і запропоновано отримувати стійке рішення задачі шляхом діагоналізації цієї матриці методом оптимального розміщення точок спостереження в межах кожного відрізку розбиття (сегменту) антени;
- досліджені компланарні лінійні АР з Z - образних і петлевих антен з ємнісними навантаженнями і показано, що для отримання в Z - образних і петлевих антенах і АР на їх основі режиму роботи близького до режиму бігучої хвилі струму і як наслідок істотного зниження частотної залежності вхідних параметрів і ДН, досить включати в плече антени не більше чотирьох ємнісних навантажень певного значення, що дозволяє спрощувати такі широкосмугові антени і економити засоби і час для їх розробки і виготовлення в порівнянні з кращими вітчизняними та зарубіжними аналогами, де пропонується включати в плече антени до декількох десятків ємнісних навантажень;
- запропоновано нові конструкції антен, ряд з яких впроваджений у виробництво і експлуатацію при установці на КА і на інших приземних та морських об'єктах, що забезпечує їх радіозв'язок з КА;
- створені нові методи розрахунків антенних решіток з цифровим управлінням для КА. Визначені оцінки нижніх границь Крамера-Рао, що дозволяє судити про точність пеленгаційних процедур у випадку відмов у прийомних каналах цифрових антенних решіток (ЦАР). Як показали результати статистичного моделювання, врахування порушень працездатності каналів ЦАР дозволить досягти помітного виграшу у точності пеленгації при незмінній потужності передавача. Крім того, вперше доведено можливість збільшення точності пеленгації цілей активною радіотехнічною системою на базі ЦАР не за рахунок підвищення потужності передавача, а шляхом використання при пеленгації джерел випромінювання алгоритмами, які враховують не ідентичність парціальних характеристик прийомних каналів ЦАР в заданому секторі в порівнянні з кращими вітчизняними та зарубіжними аналогами;
- суттєвим досягненням є встановлення конкретних обмежень на припустиму величину джиттера АЦП в каналах ЦАР. Вперше встановлено, що для лінійних решіток наявність джиттера АЦП, що проявляється розкидом тривалості періоду дискретизації з середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_{\Delta t}$  на рівні 5 % від періоду несучої (проміжної частоти), на якій проводиться оцифровка сигналів, еквівалентна майже 2-кратному

зниженню відношення сигнал-шум у синхронній ЦАР.

### Зміст роботи

В результаті виконання поставлених завдань було досліджено наближені і строгі більш точніші методи розрахунку електричних параметрів АФП, ґруntовані на рішенні інтегро-диференційних або IP в строгій постановці відносно шуканого невідомого значення комплексного розподілу струму (РС) на антені із застосуванням ЕОМ. У другому випадку в результаті визначення комплексного значення РС на антені вдається знайти її інші електричні параметри такі як комплексний коефіцієнт відбиття, вхідний опір антени або АР ( $Z_{\text{вх}}$ ), КСХН, коефіцієнт направленої дії (КНД), коефіцієнт посилення (КП), ДН і інші. Розглянуто та досліджено антени (рис. 1, а) у вигляді довільно зігнутого в площині тонкого вібратора, що ідеально проводить, завдовжки  $2d$  з круглим поперечним перерізом радіусу  $r_a$  у ізотропному однорідному середовищі без втрат та подібні прямолінійні штирьові антени з поширеним вузлом живлення (рис. 1, б).

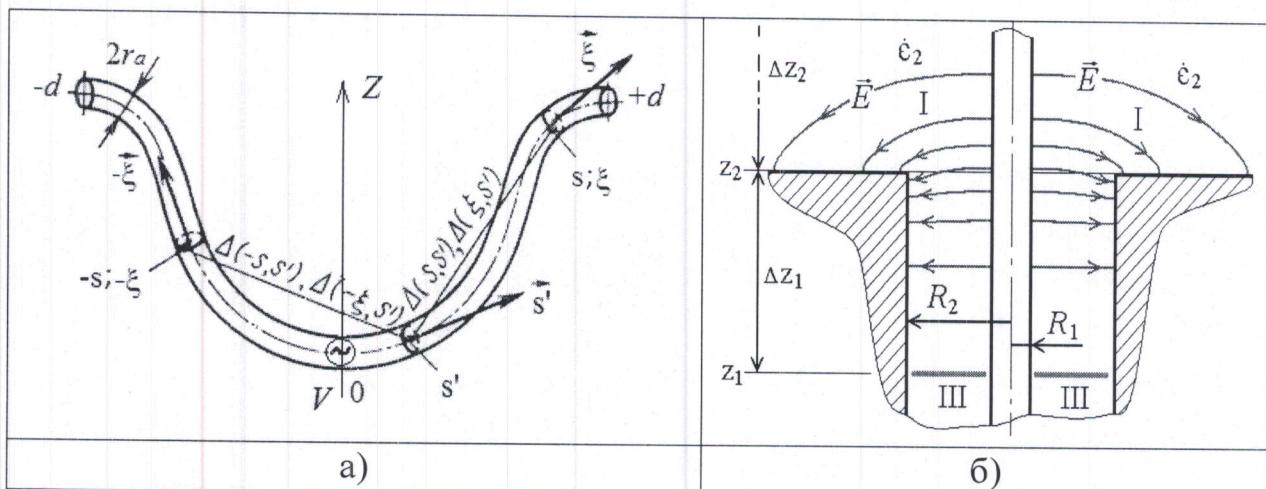


Рис.1 Розрахункові геометричні моделі металевих антен у вигляду довільно зігнутого дроту (а) та прямолінійного стрижня (б)

Для антени (рис.1, а) у системі криволінійних координат значення електричної складової поля має вигляд:

$$E_S^e(s) = \frac{i}{i\omega\epsilon_a} \int_{-d}^d I(s') \left[ \frac{\partial^2}{\partial s^2} G(s, s') + k^2 G(s, s') (\vec{s}, \vec{s}') \right] ds', \quad (1)$$

де  $\vec{s}$  і  $\vec{s}'$  - одиничні вектори, дотичні до осі вібратора в перерізах  $s$  і  $s'$  і розташовані в площині вигину вібратора;  $(\vec{s}, \vec{s}')$  - скалярні добутки одиничних векторів;  $(s, \varphi)$  - точки спостереження;  $(s', \varphi')$  - точки інтеграції;  $G$

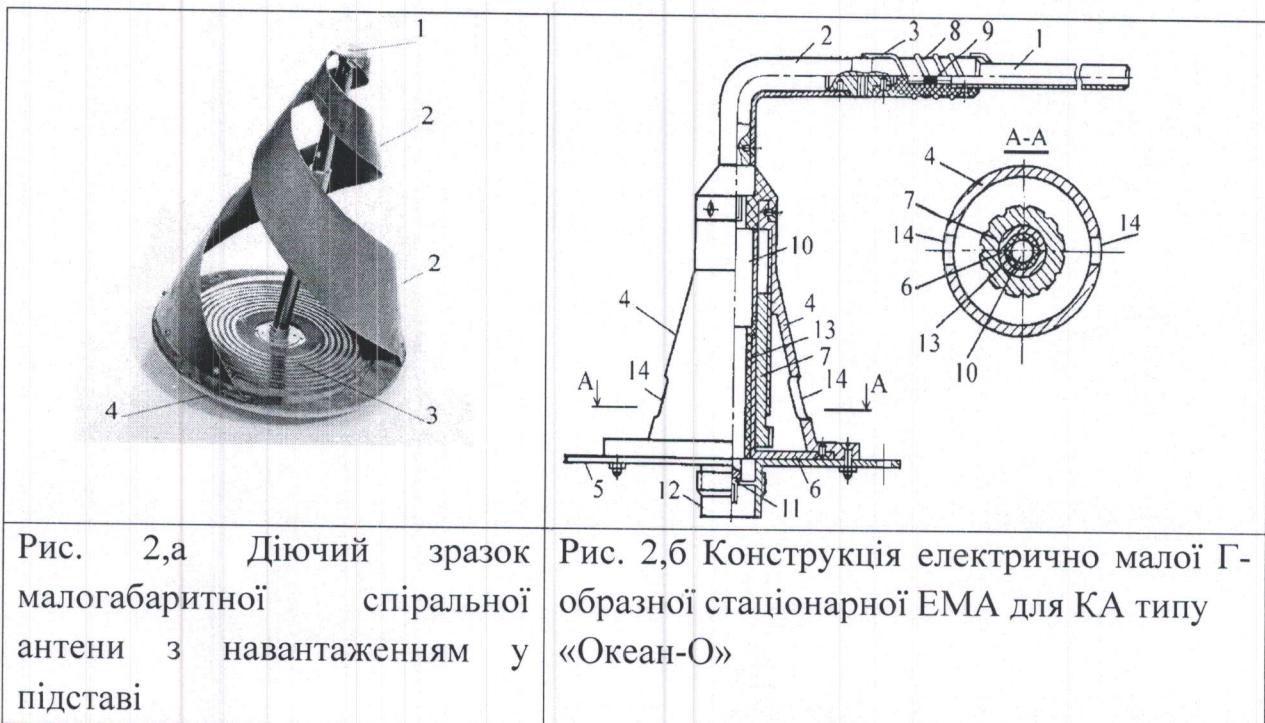
$(s, s', \varphi, \varphi')$  - функція Гріна, рівна  $e^{-ik\Delta(s, s', \varphi, \varphi')}/4\pi\Delta(s, s', \varphi, \varphi')$ ;  $\Delta(s, s', \varphi, \varphi')$  - відстань між точками спостереження і інтеграції;  $\omega$  - кругова частота і  $\epsilon_a$  - діелектрична проникність. З урахуванням граничної умови на поверхні антени отримано наступне IP

$$\begin{aligned} & \frac{d}{ds} I(s) \left\{ \frac{\partial}{\partial s'} [G(s, s') - G(-s, s')] - k^2 \int_0^{|s|} [G(\xi, s') (\vec{\xi}, \vec{s}') - G(-\xi, s')] \right. \\ & \times (-\vec{\xi}, \vec{s}') \Big] d\xi \Big\} ds' + i\omega\epsilon_a \sum_{v=1}^M \begin{cases} 0, & 0 \leq |s| < h_v \\ I(h_v) Z_v, & h_v \leq |s| \leq d \end{cases} = \\ & = \begin{cases} 0, & 0 \leq |s| < h_v, \\ i\omega\epsilon_a \frac{V}{2}, & h_v \leq |s| \leq d, \end{cases} (0 \leq |s| \leq d) \end{aligned} \quad (2)$$

де  $G(s, s')$ ,  $G(\xi, s')$  - функції Гріна для випадку точок, що знаходяться на одній і тій же гілці антени;  $G(-s, s')$ ,  $G(-\xi, s')$  - функції Гріна - точок, що знаходяться на різних гілках;  $(\vec{\xi}, \vec{s})$ ,  $(-\vec{\xi}, \vec{s})$  - скалярні добутки одиничних векторів, що знаходяться на одній і різних гілках антени відповідно;  $V$  - напруга збудливого  $\delta$ -генератора при  $h_v = 0$ . Інтеграція в (2) як по змінній  $s'$  так і  $\xi$  ведеться по одній гілці антени, що дозволило зменшити об'єм відповідної комп'ютерної програми та економити час розрахунків.

Одержане IP (2) і запропонована методика розв'язку його рішення дозволила виконувати розрахунки різноманітних типів штирьових і петльових довільно зігнутих антен з включеними навантаженнями і джерелами збудження в довільних точках антен. Тобто – вирішувати питання створення малогабаритних, багато частотних і над широкосмугових, а також антен з керованою ДН. З використанням цього IP виконано ряд розрахунків і розробок різних конструкцій антен, які з впроваджено у виробництво і експлуатацію на космічних апаратах і інших об'єктах. Наведено результати розробки в діапазоні НВЧ електрично малих антен (ЕМА) з використанням представленого вище IP що корисно для КА, де антени, що встановлюються на їх поверхні повинні якомога менше височіти над цією поверхнею. Для виконання цієї умови створено антени в конічному, Г-образному та П-образному і рамковому мікросмужковому вигляду з включеннями в них

комплексними та реактивними навантаженнями (рис. 2, а, б).



Представлена вище малогабаритна конічна спіральна антена (рис. 2,а) застосовувалася для бортових телеметричних систем різних модифікацій українських КА серії «АУОС-3» і інших у тому числі, для КА типу «AUREOL-3» за замовленням Франції, а Г-подібну антenu (рис. 2,б) впроваджено на КА «Океан-О».

Для забезпечення дуплексного радіозв'язку приземної апаратури з КА розроблено та впроваджено двочастотні бортові та приземні антени (рис.3), що було реалізоване у двох варіантах антен - з трубчастими та дротовими шунтами.

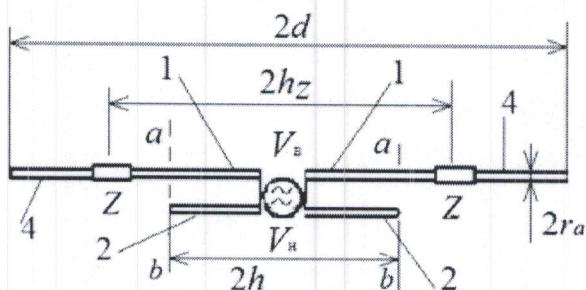


Рис.3 Геометрична розрахункова модель двочастотної антени з лінійними двопровідними шунтами ( $Z$  - реактивні або комплексні навантаження)

З урахуванням запропонованого нового методу створення двочастотних антен (рис.3) розроблена двочастотна антена S-діапазону (рис.4), а для ряду навігаційних КА запропонована квадріфілярна антена (рис. 5).

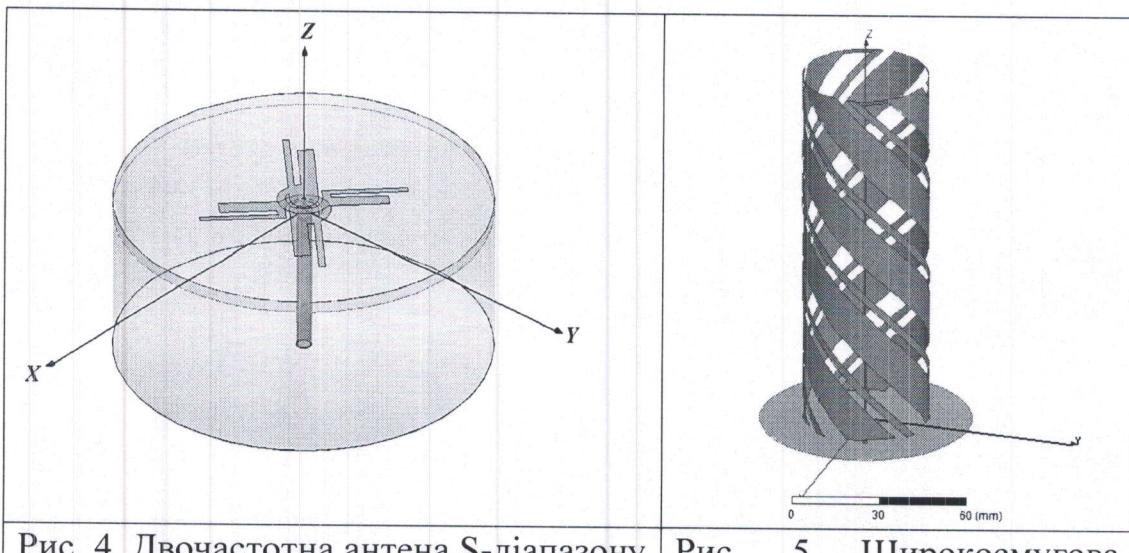


Рис. 4 Двочастотна антена S-діапазону для КА «Yuzhsat-1» і її орієнтація щодо системи координат

Рис. 5 Широкосмугова квадріфілярна антена для супутниковых систем GLONASS, NAVSTAR, GALILEO, BEIDOU

Для КА «Океан-О» розроблено лінійні АР з петлевих (рис. 6,а) та турнікетних антен колової поляризації (рис. 6,б).

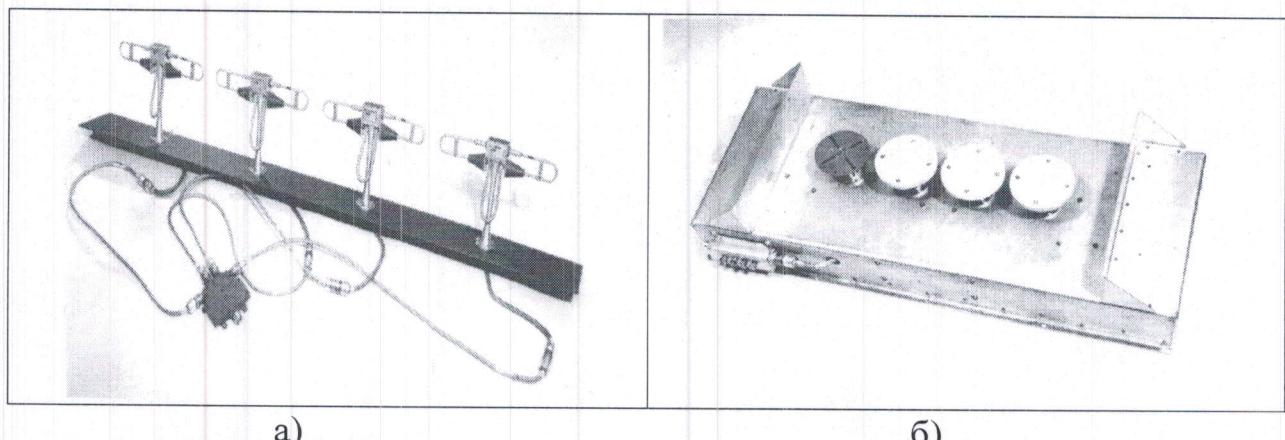


Рис. 6 Експериментальні зразки лінійних синфазних АР

Нижче на рисунку 7 представлено загальний вигляд розробленої ЦАР для космічної техніці та результат моделювання АР формату 4x8 (рис.8) для перспективних АР в діапазоні 6 ГГц. (КНД у максимумі головної пелюстки 3 складає 19,7 дБ).

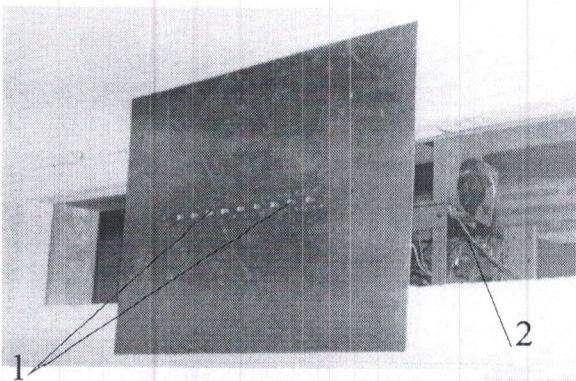


Рис. 7 Загальний вигляд лінійної 8-канальної ЦАР:  
1- антенні елементи ЦАР; 2- апаратура цифрової обробки сигналів ЦАР

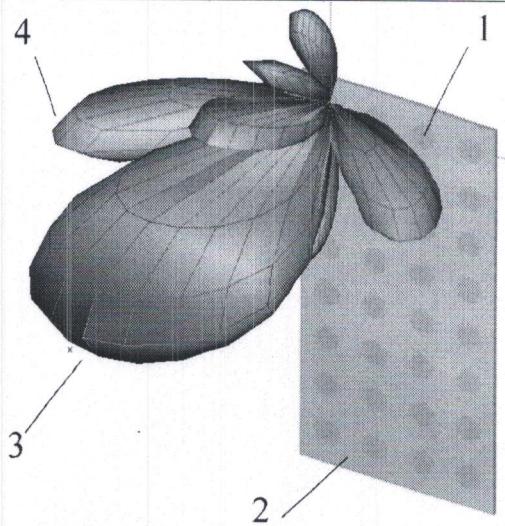


Рис. 8. ДН плоскої АР формату 4x8 при синфазному живленні та рівномірному розподілі амплітуд:  
1-друкований випромінювач,  
2-діелектрична пластина з випромінювачами,  
3 - головна пелюстка ДН,  
4-бічна пелюстка ДН

### Висновки

Таким чином відповідно до Національної космічної програми України для сучасної космічної техніки і КА України створено методи та методики розрахунків і досліджень нових АФП і АР і на їх основі розроблено, відпрацьовано та впроваджено в експлуатацію ряд АФП.

Запропоновані методи досліджень і розрахунків нових АФП та АР для КА дозволили розробити, впровадити та забезпечити їх нормальну роботу при запусках та на космічних орбітах КА за темами «АУОС-3», «АУОС-С», «НХМ», підсистеми «Океан», «Січ-1М», «Мікросупутник», «Січ-2», «EgyptSat», «Дніпро» та інших. Крім того ракетами – носіями, з розробленими АФП і АР були виведені на орбіту космічні апарати різних держав, в тому числі США, Англії, Німеччини, Японії, Росії, Єгипту, Франції, Італії та інших. Досягнуто значний техніко-економічний ефект у порівнянні з кращими вітчизняними і зарубіжними аналогами. Економічний ефект по ряду тем склав 24,48 млн. грн.

Наукова новизна і практична значимість роботи полягає в тому, що розроблені АФП і АР не мають більш ефективних аналогів як в Україні, так і інших країнах. Новизна та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 25-ю патентами, впроваджено в виробництво 8 винаходів,

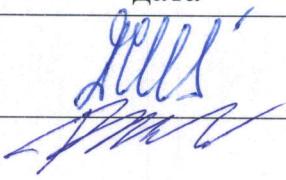
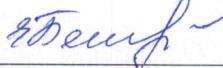
випущено 5 монографій та 3 навчальних посібника. Опубліковано 218 статей в науково-технічних журналах в тому числі 32 за кордоном, зроблено 131 доповідей на конференціях і симпозіумах в тому числі 9 за кордоном. В науково-метричної базі SCOPUS зафіксовано 196 публікацій, загальний *h*-індекс складає 3-4. В науково-метричній базі Web of Science зафіксовано 88 публікацій. В науково-метричної базі Google Scholar зафіксовано 2671 посилань, *h*-індекс складає 25.

Загальна кількість посилань на публікації авторів подання 139.

Розроблені конструкції авторів виставлялися на обласному конкурсі наукових проектів 2013 року «Молоді вчені - Дніпропетровщині» (проф. Свинаренко Д.М.); міжнародній авіаційно-космічної виставці МАКС-2007 в м. Москві (проф. Слюсар В.І.); виставці досягнень народного господарства на ВДНГ-1988 р. (проф Панченко О.Ю.) та ВДНГ-1974 р. (проф. Овсяніков В.В.).

За даною темою захищено 3 докторських та 5 кандидатських дисертацій.

#### Автори Подання:

№ п/п	ПІБ	Підпис, дата
1	СВИНАРЕНКО Дмитро Миколайович	
2	ОВСЯНІКОВ Віктор Володимирович	
3	БУХАРОВ Сергій Володимирович	
4	ЦИПКО Лідія Захарівна	
5	БЕЗНОСОВА Олена Рафітівна	
6	РОМАНЕНКО Євгеній Дмитрович	
7	СЛЮСАР Вадим Іванович	
8	ПАНЧЕНКО Олександр Юрійович	