

Е.О. Лапханов, О.С. Палій

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУННОЇ УСТАНОВКИ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ НА НАВКОЛОЗЕМНІЙ ОРБИТІ

*Анотація.* Стаття присвячена аналізу можливості застосування двигунної установки з постійними магнітами (ДУПМ) для космічних апаратів (КА) на навколоземних та навколомісячних орбітах, а також в міжпланетному просторі. Метою даної статті є дослідження можливості і ефективності застосування ДУПМ для керування орбітальним рухом КА на навколоземних та навколомісячних орбітах і траєкторією польоту при русі в міжпланетному просторі. Проведено аналіз використання електромагнітних двигунних систем для КА, виявлено переваги та недоліки. Проведено аналіз можливості і ефективності застосування ДУПМ на різних висотах навколоземних орбіт. Обрано необхідні параметри для магнітних матеріалів постійних магнітів і розроблено конструктивна схема ДУПМ. Проведено розрахунки сили тяги (гальмування), яку отримуємо при взаємодії створеної магнітосфери КА з потоком, що набігає на КА, заряджених часток іоносфери. Зроблено оцінку ефективності застосування ДУПМ і запропоновані її подальші шляхи розвитку.

*Ключові слова:* двигунна установка з постійними магнітами, орбітальний рух космічного апарату, траєкторія польоту, постійні магніти, конструктивна схем.

### Вступ

Згідно теорії, основною задачею керування будь-яким об'єктом є пошук найбільш оптимальних систем та алгоритмів керування. Рішення такої задачі, як правило, зводиться до мінімізації або максимізації одного, чи декількох параметрів керування, в залежності від необхідних вимог. Наприклад, для досягнення максимальної стійкості, потрібно використовувати багато бортової енергії, а для мінімізації витрат бортової енергії проектувати нові енергозберігаючі системи і т.д., тощо. В аерокосмічній техніці досить важливим аспектом є оптимальне використання палива та бортової

енергії. У зв'язку з цим постало питання створення найменш енерговитратних систем керування орбітальним рухом та траєкторією польоту в міжпланетному просторі.

В системах керування орбітальним рухом основними керуючими величинами являються головний вектор руху КА та головний момент. Так в системах корегування траєкторії польоту КА по орбіті та в міжпланетному просторі головна увага приділяється керуванню головним вектором руху КА. Для рішення даної задачі використовують різного типу виконавчі органи, такі як реактивні паливні та електричні двигуни, магнітні та сонячні паруси, іонні двигуни та плазмові двигуни холлівського типу.

Концепція магнітних та сонячних парусів базується на взаємодії електромагнітного поля штучної магнітосфери, що створюється за допомогою електропровідних контурів, з потоком часток сонячного вітру. Головною метою даної концепції є генерація додаткової тяги, що отримуємо в результаті збільшення площі Міделя КА, за рахунок створення штучної магнітосфери навколо КА, на яку діє динамічний натиск заряджених часток сонячного вітру. Ідея магнітних та сонячних парусів була запропонована рядом вчених в минулому столітті, і вивчається багатьма міжнародними аерокосмічними агентствами в усьому світі в наші дні. Але найповнішого доопрацювання ця теорія набула завдяки дослідженням Японського аерокосмічного дослідницького агентства в Університеті Кіото. Найбільш вдале математичне обґрунтування цієї теорії приведено в працях японських вчених Іккоя Фунакі та Хіроші Ямакава [1], а також в дисертації японського кандидата Ясумаса Ашида на здобуття степені доктора філософії в Університеті Кіото [2]. Але, у зв'язку з складністю реалізації та досить великими витратами бортової енергії ця концепція не набула практичного широкого застосування в аерокосмічній техніці.

Іншою, досить інноваційною, концепцією стала програма «Космічного пастуха» Leosweeper. За основу принципу дії даної концепції покладено застосування іонних двигунів, що базуються на передачі енергії силового імпульсу від одного КА «Пастуха» до іншого КА «Ціль» за рахунок потоку іонів, який створюється двигунною установкою КА «Пастуха». Системи даного класу є дуже ефективними при використанні їх для відведення відпрацьованих КА

(космічного сміття) з навколоземних орбіт. Але у зв'язку з великими витратами бортової енергії застосування іонних двигунів є досить нерентабельним при використанні їх для довгострокових місій та при міжпланетних перельотах.

Стосовно дії плазмових двигунів холлівського типу, в основі їх принципу дії закладено створення сильного електричного поля в плазмі. Вперше ідея про формування помітного перепаду потенціалу в плазмі була висловлена радянським фізиком А.В. Жариновим в ході досліджень розподілу потенціалу по радіусу в циліндричній магнітній пастці з магнітними «пробками» при магнетронним способом створення плазми, що містить швидкі іони. Пізніше на базі цієї ідеї були розроблені дві схеми холлівських двигунів – двигун з анодним шаром (запропонований А.В. Жариновим) і стаціонарний плазмовий двигун (запропонований А.І. Морозовим). Прийнято вважати, що розмір зони прискорення в осьовому напрямку в стаціонарному плазмовому двигуні більше, ніж в двигуні з анодним шаром. Більш детальний опис результатів сучасних досліджень проблем створення холлівських двигунів можна знайти в монографії [3]. Але, не зважаючи на досить значну потужність даних двигунів, вони використовують велику кількість бортової енергії та потребують потужних джерел енергії на КА, що призводить до додаткових конструктивних труднощів, особливо для малих космічних апаратів (МКА).

Враховуючи всі недоліки вище приведених систем було запропоноване використання постійних магнітів замість електромагнітних систем генерації штучної магнітосфери та розроблено конструктивну схему ДУПМ.

**Постанова задачі.** Головною метою даної статті є дослідження ефективності додаткової сили тяги, що отримуємо при взаємодії штучної магнітосфери, створеної за допомогою постійних магнітів, з динамічним натиском заряджених часток іоносфери. Для цього авторми статті пропонується конструктивна схема ДУПМ та проведення необхідних розрахунків для оцінки можливості застосування двигунів з постійними магнітами на низькій навколоземній орбіті, висотою 600 – 900 км.

Математична модель взаємодії штучної магнітосфери створеної постійним магнітом з натиском заряджених часток. Згідно дослідженням Японського Університету Кіото, в рамках концепції

магнітного парусу, сила, яку отримуємо при взаємодії штучної магнітосфери КА з натиском заряджених часток сонячного вітру дорівнює:

$$F_{\text{тяги}} = C_d \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot \pi \cdot L^2, \quad (1)$$

де  $C_d$  – коефіцієнт опору,

$\rho = m_i \cdot n$  – густина заряджених часток сонячного вітру,

$m_i = 1.67 \cdot 10^{-27}$  кг – маса іона,  $n$  – концентрація заряджених часток сонячного вітру,

$v$  – швидкість заряджених часток сонячного вітру,

$L$  – радіус штучно створеної магнітосфери.

Так як, авторами пропонується застосовування ДУПМ не тільки у міжпланетному просторі, а також і на навколосемній орбіті в шарах іоносфери на висоті 600 – 900 км, то в такому випадку в формулі (1) густиною  $\rho = m_i \cdot n$  буде виступати густина заряджених часток іоносфери, оскільки рух КА проводиться в межах магнітосфери Землі. Оскільки заряджені частки іоносфери не мають постійного напрямку руху, а рухаються хаотично, то величиною  $v$  в формулі (1) буде виступати швидкість КА, а потік заряджених часток іоносфери буде виступати динамічним натиском, що набігає на КА.

Радіус штучної магнітосфери розраховується із формули балансу тиску на границі магнітосфери та динамічного натиску заряджених часток

$$P_{\text{дин.}} = P_{\text{магн.}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{дин.}} = \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (3)$$

$$P_{\text{магн.}} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0}, \quad (4)$$

де  $P_{\text{дин.}}$  – динамічний тиск, створений потоком заряджених часток іоносфери (потоком заряджених часток іоносфери, що набігає на КА),

$P_{\text{магн.}}$  – статичний магнітний тиск, що врівноважує динамічний натиск заряджених часток на границі магнітосфери.

Величина магнітної індукції на магнітопаузі  $B_m$  дорівнює:

$$B_m = \frac{\mu_0 \cdot M}{4 \cdot \pi \cdot L^3}, \quad (5)$$

де  $M$  – магнітний момент,

$\mu_0$  – магнітна стала.

Після стандартних математичних перетворень можна виразити  $L$ :

$$L = \sqrt[6]{\frac{\mu_0 \cdot M^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot v^2}}. \quad (6)$$

Коефіцієнт опору  $C_d$  розраховується по наступним формулам:

$$C_d = \begin{cases} 3.6 \cdot e^{-0.28 \cdot \left(\frac{r_{Li}}{L}\right)^2}, & \frac{r_{Li}}{L} < 1 \\ \frac{3.4 \cdot e^{-0.22 \cdot \left(\frac{L}{r_{Li}}\right)^2}}{\left(\frac{r_{Li}}{L}\right)}, & \frac{r_{Li}}{L} \geq 1 \end{cases}, \quad (7)$$

де  $r_{Li}$  – Ларморовський радіус іона,

$$r_{Li} = \frac{m_i \cdot v}{B_m \cdot q_e}, \quad (8)$$

де  $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона.

При застосуванні постійних магнітів треба врахувати всі їх властивості. Як відомо з курсу теорії електрики і магнетизму постійні магніти характеризуються величиною намагніченості та залишкової магнітної індукції. Залишкова магнітна індукція чисельно дорівнює:

$$B_r = \mu_0 \cdot M_r, \quad (9)$$

де  $M_r$  – залишкова намагніченість матеріалу.

Величина магнітного моменту  $P_m$ , для розрахунків радіусу штучної магнітосфери, як відомо з курсу магнетизму, залежить від об'єму самого магніту і розраховується по формулі:

$$P_m = M_r \int_V dV, \quad (10)$$

де  $V$  – об'єм постійного магніту

Тоді з урахуванням властивостей постійних магнітів, формула (6) після математичних перетворень запишеться наступним чином:

$$L = \sqrt[6]{\frac{\mu_0 \cdot \left( M_r \cdot \int_V dV \right)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho \cdot v^2}} \quad (11)$$

Отже, таким чином складено математичну модель взаємодії постійних магнітів з динамічним натиском іоносферної плазми.

Розробка і принцип дії конструктивної схеми ДУПМ. Конструктивна схема ДУПМ складається з екранованого контейнеру 3 зі створами 4, 6, що кріпиться на КА 1; постійного магніту 2, що поміщується в екранований контейнер; шагового двигуна з кривошипно-повзунним механізмом 5, що слугує для відкривання та закривання створів екранованого контейнера. Конструктивна схема представлена на рис.1.

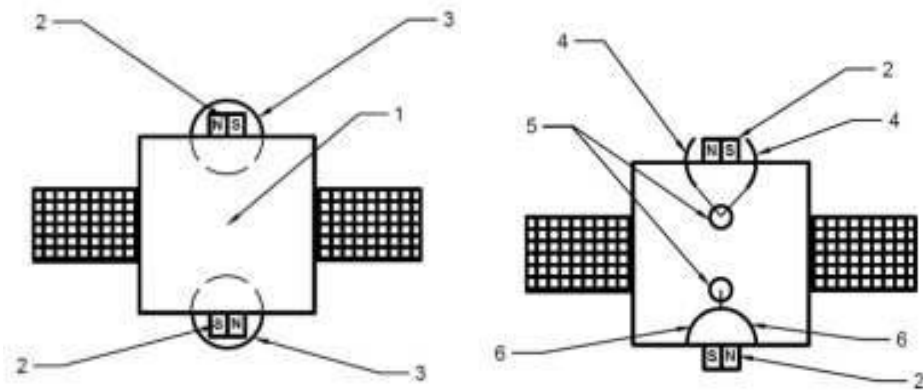


Рисунок 1 – Конструктивна схема ДУПМ

Принцип дії ДУПМ базується на генерації штучної магнітосфери за допомогою постійних магнітів після відкривання екранованих контейнерів. При русі по навколосемній орбіті в шарах іоносфери динамічний натиск іонів плазми  $P$ , що набігає на площу магнітосфери створює гальмівну силу  $F_{гал}$ . Вектор гальмівної сили напрямлений у протилежну сторону відносно вектора швидкості та головного вектора руху КА по орбіті, рис. 2. Екрановані контейнери забезпечують необхідний алгоритм створення штучної магнітосфери, а звідси і додаткової тяги, при відкриванні, в залежності від завдань керування.

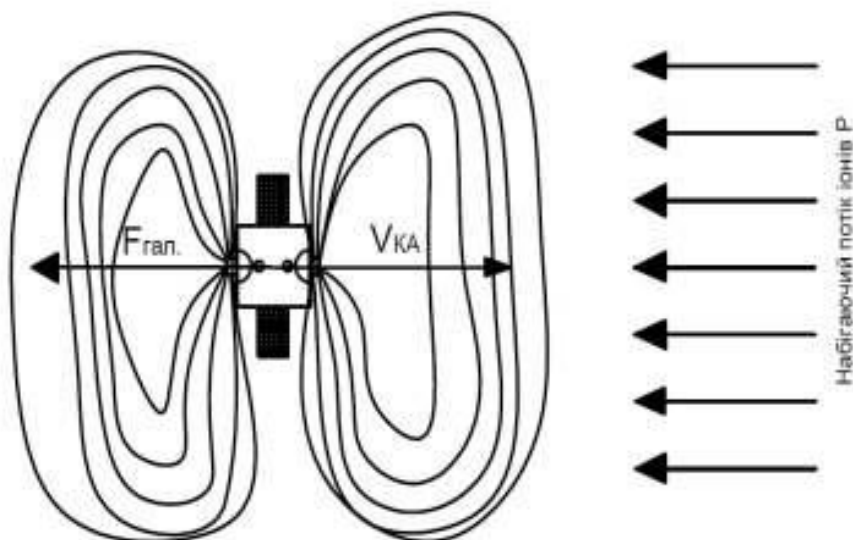


Рисунок 2 – Гальмівна сила при русі КА по навколоземній орбіті на висоті 600 – 900 км

Для розробки конструктивної схеми ДУПМ, по-перше, необхідно вибрати магнітний матеріал постійного магніту, який має оптимальні магнітні та теплофізичні характеристики, що відповідають вимогам при експлуатації на навколоземній орбіті в шарах іоносфери. Відомо, що згідно стандарту [4], температура на навколоземній орбіті в шарах іоносфери на висоті 600 – 900 км, в залежності від сонячної активності, коливається від 696 – 1310 К. Згідно даним температурним показникам, проаналізуємо теплофізичні характеристики постійних магнітів, що приведено в табл. 1 [5]. Виходячи з даних показників, постійним магнітом, що найбільш відповідає температурним вимогам експлуатації на навколоземній орбіті в шарах іоносфери та у відкритому космосі, є матеріал Alnico 5. Alnico 5 має максимальну температуру експлуатації  $T_{\max} = 771$  К та не потребує сильного термодинамічного захисту. Також Alnico 5 має оптимальні показники густини, що є досить важливим при розрахунках додаткової маси КА.

Аналізуючи дані магнітних характеристик, можна зробити висновок, що Alnico 5 має досить високі показники залишкової магнітної індукції  $B = 1,25$  Тл, а при повній магнітній поляризації може досягнути  $J = 1,4$  Тл., що є досить важливим при розрахунках характеристик штучної магнітосфери.

Таблиця 1

## Теплофізичні характеристики постійних магнітів

Магнітний матеріал	Густина $\rho \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Термічне розширення $\alpha \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Питомий електричний опір $\rho' \text{ Ом} \cdot \text{м}$	$T_{\text{max}}$ К
$\text{SrFr}_{12}\text{O}_{19}$	4300	10	$10^8$	521
Alnico 5	7200	12	0,5	771
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	8400	10	0,9	621
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	7400	-2	1.5	431

Таблиця 2

## Магнітні характеристики постійних магнітів

Магнітний матеріал	Залишкова магнітна індукція $B_r = \mu_0 \cdot M_r \text{ (Тл)}$	Повна магнітна поляризація $J$ (Тл)	Внутрішня коерцитивність $H_c \text{ кА/м}$ Виміряна на петлі М(Н)	Стандартна коерцитивність $H_c \text{ кА/м}$ виміряна на петлі В(Н)
$\text{SrFr}_{12}\text{O}_{19}$	0,42	0,47	275	265
AlNiCo	1,25	1,4	54	52
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	1,08	1,15	1100	800
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	1,28	1,54	1000	900

Отже, виходячи з усіх характеристик магнітних матеріалів, найбільш оптимальним постійним магнітом для ДУПМ є Alnico 5.

Наступним кроком, при розробці конструктивної схеми, є вибір екрануючого матеріалу для контейнерів. Найбільш економічно вигідним та надійним є багатошарові плівкові екранні матеріали, що виготовляються методом електролітичного нанесення на алюмінієвий каркас магнітних слоїв NiFe товщиною від 10 мкм до 150 мкм, та слоїв міді, товщиною 5-10 мкм [6].

Для розрахунків магнітного моменту по формулі (10) необхідно обрати форму об'єму постійного магніту  $V$ . В першому наближенні, для простоти розрахунків, оберемо форму постійного магніту в вигляді призми та циліндра, що поміщуються в екранований напівсферичний контейнер (див. рис. 1):

$$V_1 = a \cdot b \cdot l \quad (14)$$

$$V_2 = \pi \cdot R^2 \cdot l \quad (15)$$

магніту де  $a$  – довжина призмичного магніту,  
 $b$  – ширина призмичного магніту,



$R$  – радіус циліндричного магніту,

$l$  – товщина (циліндричного і призмічного).

Розрахунок сили тяги та гальмування, що дає постійний магніт Alnico 5 буде приведено у наступному розділі статті.

Розрахунок сили тяги (гальмування), що дає ДУПМ та оцінка її ефективності. При русі КА по навколосемній орбіті його орбітальна швидкість розраховується по формулі:

$$v_{орб.} = \sqrt{\frac{\mu}{H + R_{зем.}}}, \quad (16)$$

де  $\mu = 3.986 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 / \text{с}^2$  – гравітаційний параметр Землі,

$R_{зем.}$  – радіус Землі,

$H$  – висота від 600 до 900 км (візьмемо чотири проміжних положення 600 км, 700 км, 800 км, 900 км).

Густина заряджених часток  $\rho_{іон.} = m_i \cdot n$  в іоносфері на висотах 600 км, 700 км, 800 км і 900 км вдень розраховується із [4].

Представимо розрахунки швидкості і густини в табл. 3

Таблиця 3

Орбітальна швидкість і густина заряджених часток  
в іоносфері (600 – 900 км)

Висота $H$ км	600	700	800	900
Орбітальна швидкість КА $v_{орб.}$ м/с	7562	7508	7456	7404
Щільність заряджених часток вдень $\rho_{іон.дн.}$ кг / м <sup>3</sup>	$9,3 \cdot 10^{-16}$	$4,5 \cdot 10^{-16}$	$2,5 \cdot 10^{-16}$	$1,5 \cdot 10^{-16}$
Щільність заряджених часток вночі $\rho_{іон.ніч.}$ кг / м <sup>3</sup>	$4,2 \cdot 10^{-16}$	$2,3 \cdot 10^{-16}$	$1,4 \cdot 10^{-16}$	$9,6 \cdot 10^{-17}$

Маючи характеристики орбітальної швидкості, густини заряджених часток, а також характеристики постійного магніту, використовуючи алгоритм (1-13) можна розрахувати гальмівну силу для КА на навколосемній орбіті. Підставивши значення з формули (13) в (1), та з урахуванням (14) і (15), формула для обчислення гальмівної сили прийме вид:

$$F_{гальм.1} = C_d \cdot \frac{\rho_{іон.дн./ніч.} \cdot v_{орб.}^2}{2} \cdot \pi \cdot \sqrt[3]{\frac{(B_r \cdot \pi \cdot R^2 \cdot l)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho_{іон.дн./ніч.} \cdot v_{орб.}^2 \cdot \mu_0}} \quad (17)$$

$$F_{гальм.2} = C_d \cdot \frac{\rho_{ион.дн./нч.} \cdot v_{орб.}^2}{2} \cdot \pi \cdot \sqrt[3]{\frac{(B_r \cdot a \cdot b \cdot l)^2}{8 \cdot \pi^2 \cdot \rho_{ион.дн./нч.} \cdot v_{орб.}^2 \cdot \mu_0}} \quad (18)$$

Використовуючи формули (17) і (18) розрахуємо гальмівну силу для двох видів об'ємів  $V_1$  та  $V_2$  магніту Alnico 5 з урахуванням густини заряджених часток вдень  $\rho_{ион.дн.}$  і вночі  $\rho_{ион.нч.}$  та розрахунків  $C_d$  (з першого виразу, формули 7). Стосовно габаритних характеристик постійних магнітів виберемо три варіанти для призмичного магніту з  $a = b = 0,1; 0,3; 0,5 м$  та циліндричного з  $R = 0,1; 0,3; 0,5 м$  з постійною товщиною  $l = 0,01 м$  для кожного з них. Представимо розрахунки гальмівної сили для висоти 600 км в табл. 4.

Таблиця 4

Розрахунок гальмівної сили, що створює ДУПМ на висоті 600 км

Розмір магніту (a=b=R), м	0.1	0.3	0.5
$F_{гальм.1ДЕНЬ}$ , Н	$1,132 \cdot 10^{-3}$	$4,897 \cdot 10^{-3}$	$9,677 \cdot 10^{-3}$
$F_{гальм.1НІЧ}$ , Н	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$

По розрахунках гальмівної сили для висоти 600 км, можна зробити висновок, що максимальну силу отримуємо вдень, коли щільність заряджених часток іоносфери максимальна. Для оцінки ефективності дії гальмівної сили, розрахуємо збурення, що діють на КА на висоті 600 км. Головними збуреннями, що діють на КА, є гравітаційні збурення та аеродинамічний натиск (сила атмосферного гальмування). В даному випадку, для оцінки ефективності дії гальмівної сили її треба порівняти з силою аеродинамічного натиску, що дає збурення і гальмує КА. Сила аеродинамічного натиску розраховується по формулі:

$$F_{аерд.гальм} = C_x \cdot \frac{\rho_{атм.} \cdot v_{орб.}^2}{2} \cdot S_{Мід.} \quad (19)$$

де  $C_x = 2,2$  – коефіцієнт аеродинамічного гальмування,

$\rho_{атм.}$  – щільність атмосфери,

$S_{Мід.}$  – переріз Міделя КА.

Для першого наближення візьмемо форму КА у вигляді куба (кубсат), з ребром  $k$ , та проаналізуємо силу аеродинамічного гальму-

вання для КА на які можна було б встановити магніти ДУПМ із табл. 4. Візьмемо  $k = 0,2; 0,6; 1$ , та розрахуємо аеродинамічне гальмування, де переріз Міделя у випадку неорієнтованого руху розраховується по формулі:

$$S_{\text{Мид.}} = \frac{S_{\text{п.п.КА}}}{4}, \quad (20)$$

де  $S_{\text{п.п.КА}}$  – площа повної поверхні КА, що взаємодіє з набігаючим натиском атмосфери.

У випадку кубічної форми КА, формула (20), запишеться, як:

$$S_{\text{Мид.}} = 1,5 \cdot k^2 \quad (21)$$

Представимо розрахунки аеродинамічного збурення (гальмування) в табл.5.

Таблиця 5

Розрахунок аеродинамічного гальмування на висоті 600 км

Розмір КА (к),	0.2	0.6	1
$F_{\text{аерд.гальм}}, \text{ Н}$	$4,642 \cdot 10^{-8}$	$4,178 \cdot 10^{-7}$	$1,16 \cdot 10^{-6}$

Так, порівнюючи дані із таблиць 4 і 5, можна зробити висновок, що використання ДУПМ на висоті 600 км є доцільним, оскільки гальмівна сила, яку створює ДУПМ на декілька порядків більша, ніж сила аеродинамічного гальмування. Отже, при відкриті створів екранованих контейнерів загальна гальмівна сила, що дорівнює сумі аеродинамічного гальмування і гальмівної сили ДУПМ збільшується на декілька порядків. Використовуючи ДУПМ, можна при мінімальних витратах зменшувати висоту орбіти КА, та зводити з орбіти, після закінчення терміну експлуатації, рис. 3

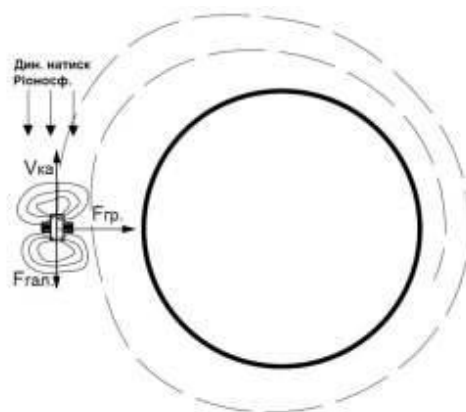


Рисунок 3 – Відведення КА з орбіти з використанням ДУПМ

Згідно отриманим розрахункам, на висотах 700 – 900 км, сила гальмування зменшується всього на декілька одиниць того ж порядку, що і на висоті 600 км, з чого можна зробити висновок, що значення сили гальмування є достатнім для застосування ДУПМ в даних умовах, як системи керування висотою польоту КА, та системи відведення його з орбіти по закінченню терміну активної експлуатації.

### **Висновки**

Результати розрахунків показали, що застосування ДУПМ на навколоземній орбіті, є досить ефективним, оскільки отримуємо тягу достатню для здійснення керування орбітальним рухом та траєкторією польоту КА. Використання ДУПМ на навколоземній орбіті є найбільш доцільним при рішенні задач зниження висоти орбіти КА та відведення з орбіти відпрацьованих КА. Також, виходячи з розрахунків, ДУПМ підходить для великого розмірного ряду КА. На навколоземній орбіті ДУПМ є досить вигідною системою відведення з орбіти відпрацьованих КА, оскільки не потребує додаткової бортової енергії та палива

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Ikkoh Funaki. Solar Wind Sails, Exploring the Solar Wind / Ikkoh Funaki, Hiroshi Yamakawa // InTech. – 2012. - №65,  
URL: <http://www.intechopen.com/books/exploring-the-solar-wind/solar-wind-sails> (дата звертання 09.13.2018).
2. Yasumasa Ashida. Study on propulsive characteristics of magnetic sail and magneto plasma sail by plasma particle simulations: PhD dissertation. - Kyoto, 2014 – p. 7 –15.  
URL: [https://repository.kulib.kyotou.ac.jp/dspace/bitstream/2433/196686/1/rishsh%2001000\\_028.pdf](https://repository.kulib.kyotou.ac.jp/dspace/bitstream/2433/196686/1/rishsh%2001000_028.pdf) (дата звертання 09.13.2018).
3. Горшков О.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / О.А. Горшков, В.А. Муравлев, А.А. Шагайда // -М. Машиностроение, 2008, 280с.
4. European cooperation for space standardization. Space engineering and space environment. ECSS-E-ST-10-04C, 2008.
5. Coey. J. Magnetism and magnetic materials / J. Coey // Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York, –2010., P. 471.
6. Пат. РФ на винахід 2030139, МПК7 В 64 G 9/00. Магнитный экран / М. Ф. Остриков, В. С. Кирилкін. – 5021893/21; заявл. 25.12.91 ; опубл. 27.02.95.