

УДК 629.7.05

Б.Б. Самотокін, д.т.н., проф.

Д.М. Шостачук, к.т.н., доц.

А.М. Шостачук, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

## ОРІЄНТАЦІЯ ШТУЧНОГО СУПУТНИКА ЗЕМЛІ В ГЕОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

У статті проаналізовано вплив основних збурювальних моментів, які діють на супутник, залежність їх від висоти польоту. Зроблено аналіз геомагнітного поля та визначено аналітичні вирази для складових головного магнітного поля Землі з урахуванням векторних варіацій поля, а також складових діючого на супутник магнітного моменту.

**Постановка проблеми.** В роботі [1] була доведена необхідність створення методики оцінювання ефективності того чи іншого способу орієнтації штучних супутників Землі (ШСЗ) із врахуванням динаміки руху супутника (з можливим впливом рухомих частин всередині космічного апарата), типу (алгоритму) розвантаження накопичувачів кінетичного моменту, величини і напрямку малозмінних гравітаційного та магнітного полів у поточній точці траєкторії супутника та в наступні моменти часу, висоти траєкторії ШСЗ, характеру можливих випадкових збурень. Одним із чинників, які суттєво впливають на орієнтацію супутника, є магнітне поле Землі (МПЗ). Поряд з тим, магнітне поле не тільки є збурювальним фактором, але і використовується для керування орієнтацією супутника в системах з магнітним магнітоприводом. Тому при аналізі того чи іншого способу орієнтації супутника дуже важливим є мати аналітичну модель геомагнітного поля, яка може коригуватися при русі супутника по орбіті.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

## 1. Збурювальні моменти.

Розглянемо чинники, які викликають зміну орієнтації супутника [2]: магнітне поле Землі, електричне поле Землі, тиск сонячного випромінювання, бомбардування метеорними тілами, космічне випромінювання, гравітаційне поле Землі, рухомі елементи всередині супутника, випадкові магнітні збурення, аеродинамічний момент.

Величини кожного з цих моментів відрізняються для різних ділянок траєкторії польоту, а також залежать від розмірів, форми та інших властивостей ШСЗ. На рис. 1 зображені області дії деяких збурювальних моментів залежно від висоти польоту супутника [3]. Моменти визначені для трьох геометричних схем супутника: диска, диска із стабілізатором і гантелі.

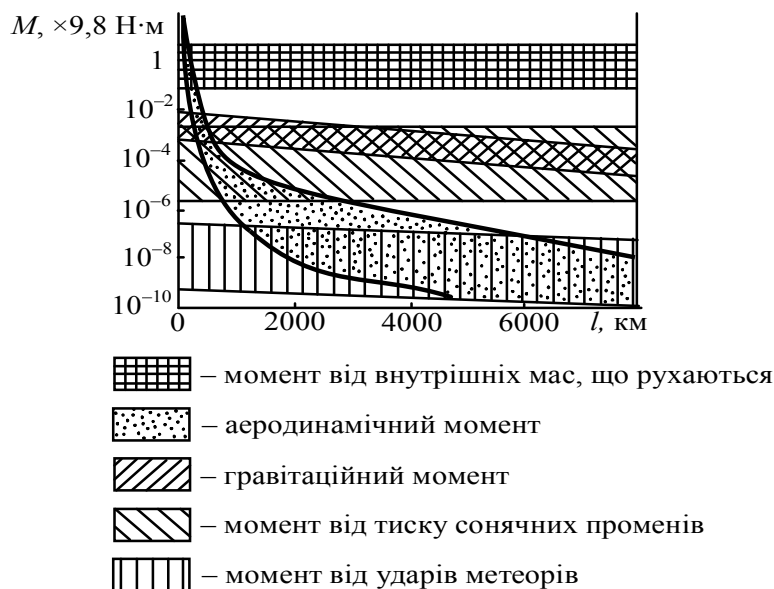


Рис. 1. Моменти, що діють на супутник при висоті польоту від 0 до 8 тис. км над поверхнею Землі

Нижні межі областей відповідають диску, верхні межі для гравітаційного та внутрішнього моментів – гантелі аеродинамічного моменту і моменту від тиску сонячного випромінювання і ударів метеорів – диску із стабілізатором. При проектуванні супутника намагаються використовувати ці моменти як стабілізуючі фактори, або звести до мінімуму їх збурювальні дії.

2. Магнітне поле Землі.

При виконанні польоту супутником в його корпусі, якщо він виконаний із струмопровідних матеріалів, можуть виникати вихрові струми як внаслідок зміни складової магнітної напруженості, так і внаслідок обертання супутника навколо центра мас. Взаємодія магнітного поля вихрових струмів та МПЗ створює момент, прикладений до ШСЗ. Взаємодія геомагнітного поля із струмами, які протікають в електричних колах обладнання супутника також призводить до появи моментів.

Величина МПЗ над полюсами приблизно в 2 рази більша, ніж на екваторі. На рис. 2 показані експериментальна та теоретична криві напруженості поля диполя залежно від відстані від центра Землі. З наведених кривих можна зробити висновок, що на відстанях від 15 до 30 тис. км від центра Землі експериментальні дані суттєво відрізняються від теоретичних [4]. Це дозволяє висунути припущення, що на таких висотах на магнітне поле Землі впливають магнітні поля інших джерел міжпланетного простору. Вплив магнітних полів цих джерел необхідно розглядати окремо.

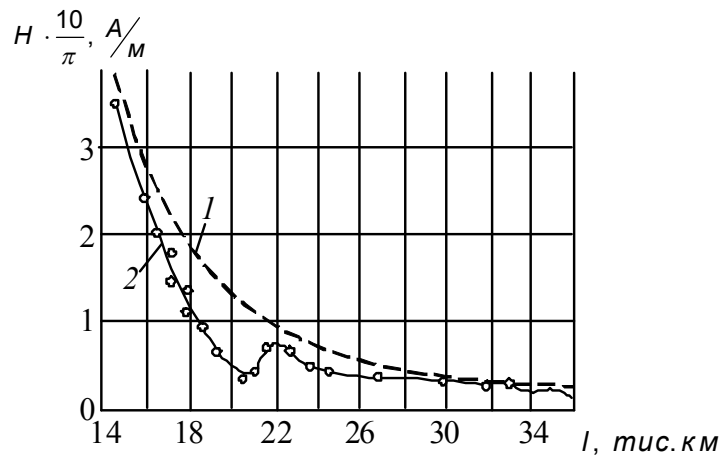


Рис. 2. Зміна напруженості магнітного поля в залежності від відстані від центра Землі: 1 – теоретична крива; 2 – виміряні значення напруженості

В [5] висвітлені фізичні основи геомагнетизму, причини виникнення головного та локальних полів, наведені карти складових та повної напруженості геомагнітного поля. Автор представив карти добових та столітніх варіацій МПЗ, магнітних збурень, а також коефіцієнти Гауса для обчислення величини геомагнітного поля.

Вважають, що вектор напруженості МПЗ  $T$  є геометричною сумою таких складових [6, 7]:

$$T = T_d + T_m + T_a + T_e + dT,$$

де  $T_d$  – дипольна частина поля, яка обумовлена однорідним намагніченням земної кулі;

$T_m$  – недипольна частина геомагнітного поля (материкове поле), яка пов'язана з наявністю неоднорідних шарів земної кулі;

$T_a$  – складова поля, яка викликана намагнічуванням земної поверхні;

$T_e$  – складова поля, яка викликана електричними струмами в іоносфері;

$dT$  – поле магнітних варіацій.

Суму полів  $T_n = T_d + T_m + T_e$  зазвичай називають нормальним полем, а поле  $T_a$  – аномальним полем. Дипольна модель МПЗ на поверхні земної кулі дає наближення до точної моделі близько 80 %, та має тенденцію до збільшення точності наближення в міру віддалення від Землі (85 % – на відстані  $1,2 r$ , 90 % – на відстані  $1,5 r$  тощо, де  $r = 6378$  км – середній радіус Землі).

На сьогоднішній день географічні координати магнітних полюсів дорівнюють: для північного полюса  $78,5^0$  півн. шир.,  $69,1^0$  захід. довг.; для південного –  $78,5^0$  півд. шир.,  $110^0$  схід. довг., що відповідає нахилу осі диполя до осі обертання Землі на кут  $11,5^0$ .

На рис. 3 показано закон збільшення частки дипольної частини геомагнітного поля із збільшенням відстані  $l$  від поверхні Землі [8].

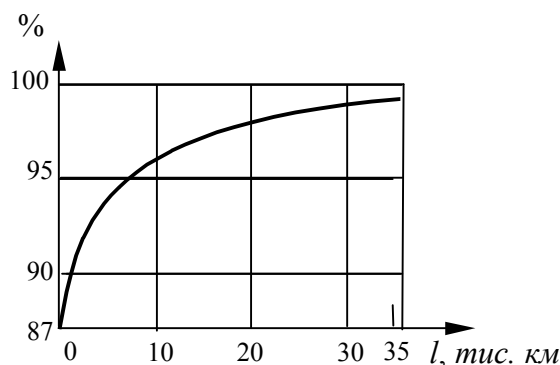


Рис. 3. Збільшення частки дипольної частини геомагнітного поля із збільшенням відстані \$l\$ від Землі

Як видно з рис. 3, дипольна складова має 95 % від загального поля вже при висоті приблизно \$l = 7,5\$ тис. км від поверхні Землі.

**Виділення невіршених раніше частин проблеми.** На сьогоднішній день відомі алгоритми орієнтації штучних супутників Землі не використовують МПЗ для отримання прогнозу моделі збурювального моменту, діючого на супутник при його русі по орбіті та відносно центра мас. Це не дає можливості отримати модель керуючого моменту при використанні в системах орієнтації моментних магнітоприводів, що призводить до зайвих витрат енергії обладнанням супутника.

**Метою даної статті** є визначення аналітичної моделі МПЗ при русі супутника по орбіті та відносно центра мас. Ця модель може бути використана надалі при визначенні оптимального, з точки зору витрат енергії, способу орієнтації та коригуватись при русі супутника по орбіті, зокрема при використанні способу орієнтації ШСЗ із прогнозними моделями накопиченого кінетичного моменту та геомагнітного поля [9].

**Основний матеріал дослідження.** У теорії земного магнетизму використовується, як правило, прямокутна система координат, в якій вісь \$x\$ лежить в площині географічного меридіана і спрямована на північ, вісь \$z\$ – вертикально вниз, а вісь \$y\$ – на схід. Проекція вектора \$\mathbf{H}\$ на вісь \$x\$ називається північною складовою \$X\$, на вісь \$y\$ – східною складовою \$Y\$, на вісь \$z\$ – вертикальною складовою \$Z\$. Проекція вектора на горизонтальну площину називається горизонтальною складовою \$T\$, кут між віссю \$x\$ та площиною магнітного меридіана – магнітним схиленням \$D\$, кут між вектором \$\mathbf{H}\$ та горизонтальною площиною – магнітним нахиленням \$I\$.

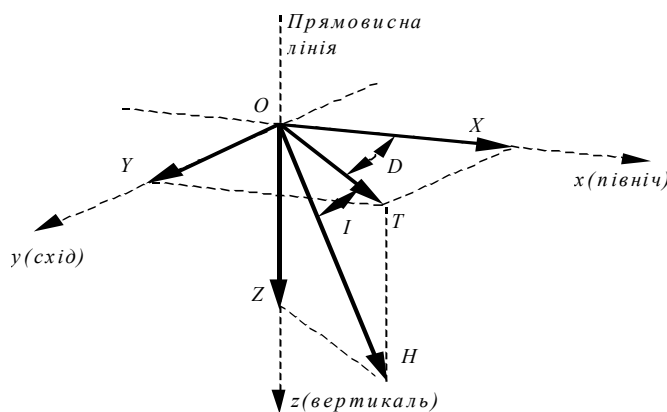


Рис. 4. Елементи геомагнетизму

Побудова моделі для опису внутрішньої та зовнішньої частин геомагнітного поля відбувається за допомогою обробки результатів вимірювання мережі магнітометричних станцій. На сьогодні головну складову МПЗ описують таким чином [10]:

$$U_1 = r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m \cos\theta + r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (E_n^m \cos m\lambda + e_n^m \sin m\lambda) \left(\frac{R}{r}\right)^n P_n^m \cos\theta, \tag{1, a}$$

де \$U\$ – потенціал геомагнітного поля;

$r$  – середній радіус Землі;

$R, \theta, \lambda$  – сферичні координати точки простору, в якій обраховується потенціал:  $R$  – довжина радіус-вектора точки, побудованого з центра геоїда,  $\theta$  – кут між цим радіус-вектором та віссю обертання Землі,  $\lambda$  – географічна довгота точки;

$I_n^m, i_n^m$  – сталі коефіцієнти, які відповідають внутрішній частині поля;

$E_n^m, e_n^m$  – сталі коефіцієнти, які відповідають зовнішній частині поля;

$P_n^m$  – приєднана функція Лежандра першого роду:

$$P_n^m(\cos\theta) = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot \dots \cdot (2n-1) \sqrt{\frac{e_m}{(n+m)!(n-m)!}} \sin^m \theta \times$$

$$\left[ \cos^{(n-m)} \theta - \frac{(n-m)(n-m-1)}{2(2n-1)} \cos^{(n-m-2)} \theta + \frac{(n-m)(n-m-1)(n-m-2)(n-m-2)}{2 \cdot 4 \cdot (2n-1)(2n-3)} \cos^{(n-m-4)} \theta + \dots \right].$$

Коефіцієнти  $E_n^m$  та  $e_n^m$  ряду (1, а) відносно малі, тому в подальшому будемо враховувати тільки внутрішнє поле. Таким чином, головне поле запишеться так:

$$U_1 = r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m \cos \theta. \quad (1, б)$$

Напруженість поля  $H$  з потенціалом [1, б] визначається таким чином:

$$H = -\text{grad} U. \quad (2)$$

Потенціал внутрішнього поля (і відповідно, коефіцієнти  $I_n^m$  та  $i_n^m$  ряду (1, б)) з плином часу змінюються. Для спрощення обчислення потенціалу геомагнітного поля приймається, що коефіцієнти  $I_n^m$  та  $i_n^m$  змінюються стрибком при переході до наступного року, а протягом поточного року – незмінні (використовуються їх середні за час протягом року значення).

Основну частину внутрішнього поля (головне геомагнітне поле) можна достатньо точно описати 20–30 гармоніками ряду (1, б), при цьому точність апроксимації відрізком ряду залежить від того, наскільки швидко ряд сходиться [11]. Але оскільки із зростанням номера  $n$  кількість коефіцієнтів, які підлягають визначенню, різко зростає (воно дорівнює  $n(n+2)$ ), то на практиці кількість коефіцієнтів, які необхідно визначити, невелика. У 1968 році Міжнародна Асоціація геомагнетизму та аеронмії (МАГА) прийняла Міжнародне еталонне геомагнітне поле МEGП (IGRF: International Geomagnetic Reference Field), яке було побудовано шляхом визначення середніх коефіцієнтів декількох моделей геомагнітного поля. Одночасно був прийнятий Міжнародний потенціал векторних варіцій поля:

$$U_2 = r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m \cos \theta. \quad (3)$$

Для розрахунків коефіцієнтів  $I_n^m$  та  $i_n^m$  використовуються такі формули:

$$I_n^m(t) = I_n^m(1975, 0) + (t - 1975, 0) g_n^m;$$

$$i_n^m(t) = i_n^m(1975, 0) + (t - 1975, 0) h_n^m,$$

де  $t$  – час (в роках) періоду після 1975 року.

Таблиця 1

Коефіцієнти часових варіацій геомагнітного поля

n	m	Епоха 1975,0			
		$I_n^m$	$i_n^m$	$g_n^m$	$h_n^m$
1	0	-30186	-	25,6	-
	1	-2036	5735	10,0	-10,2
2	0	-1898	-	-24,9	-
	1	2997	2124	0,7	-3,0
	2	1551	-37	4,3	-18,9
3	0	1299	-	-3,8	-
	1	-2144	-361	-10,4	6,9
	2	1296	249	-4,1	2,5
	3	805	-253	-4,2	-5,0

Як видно з табл. 1, коефіцієнти для часових варіацій  $g_n^m$  і  $h_n^m$  значно менші за коефіцієнти  $I_n^m$  і  $i_n^m$ , які визначають величину головного поля.

Оскільки загальне поле у будь-який момент часу  $U = U_1 + U_2$ , то вираз (2) можна записати таким чином:

$$H = -\text{grad}U = -\text{grad}(U_1 + U_2), \tag{4}$$

де значення для головного поля та його варіацій визначається згідно з виразами (1,б), (3).

Розглянемо вплив геомагнітного поля на ШСЗ для двох випадків:

1. Супутник–тверде тіло, яке здійснює кутові рухи відносно центру тяжіння
2. Супутник–матеріальна точка, яка здійснює рух по орбіті.

*Супутник–тверде тіло.*

Забезпечення заданого кутового руху є однією з найважливіших задач, яку доводиться розв’язувати протягом всього польоту. Супутнику задається необхідне кутове положення відносно ліній напруженості геомагнітного поля шляхом повороту ШСЗ відносно його центра мас. При цьому супутник, наприклад, своїм днищем, на якому розташовані антена спрямованої дії або об’єктив відеокамери, повинен бути постійно спрямований на Землю.

Спроектуюмо вектор напруженості  $H$  на осі прямокутної базової орбітальної системи координат  $x, y, z$  спутника при русі останнього відносно центра мас. Складові вектора напруженості будуть мати вигляд:

– по осі  $x$ :

$$\begin{aligned} H_{x_r} &= \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{1}{R} \frac{\partial (U_1 + U_2)}{\partial \theta} = \\ &= \frac{1}{R} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta) \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{\partial}{\partial \theta} \left( r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda \right) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta) \right] = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta} \left[ (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) + (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \right]; \end{aligned} \tag{5}$$

– по осі  $y$ :

$$\begin{aligned} H_{y_r} &= -\frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \lambda} = \frac{1}{R} \frac{\partial (U_1 + U_2)}{\partial \theta} = \\ &= -\frac{1}{R \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta) \right) + \right. \\ &+ \left. \frac{\partial}{\partial \lambda} \left( r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda \right) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta) \right] = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r}{R}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n m \frac{P_n^m(\cos\theta)}{\sin \theta} \left[ (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) + (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \right]; \end{aligned} \tag{6}$$

– по осі  $z$ :

$$\begin{aligned}
 H_{z_r} &= \frac{\partial U}{\partial R} = \frac{\partial (U_1 + U_2)}{\partial R} = \\
 &= \left[ \frac{\partial}{\partial R} \left( r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta) \right) + \right. \\
 &+ \left. \frac{\partial}{\partial R} \left( r \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta) \right) \right] = \\
 &= -\sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \left(\frac{r}{R}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n P_n^m \cos(\theta) \left[ (I_n^m \cos m\lambda + i_n^m \sin m\lambda) + (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \right].
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

У роботі [12] авторами пропонується обмежитись трьома членами розкладення у виразах (5–7). У такому випадку співвідношення, які визначають співвідношення вектора напруженості магнітного поля Землі на осі орбітальної системи координат, будуть мати такий вигляд:

$$H_x = \left(\frac{r}{R}\right)^3 \left[ -g_1^0 \sin \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \cos \theta \right];
 \tag{8}$$

$$H_y = \left(\frac{r}{R}\right)^3 \left[ -g_1^1 \sin \lambda - h_1^1 \cos \theta \right];
 \tag{9}$$

$$H_z = -2 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 \left[ -g_1^0 \cos \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \sin \theta \right].
 \tag{10}$$

Автори вважають допустимим використовувати модель магнітного поля Землі, яка записана за допомогою виразів (8)–(10), при наявності на борту супутника високочотних магнітометрів, покази яких будуть коригувати отриману раніше аналітичну модель геомагнітного поля при русі супутника по орбіті.

*Супутник–матеріальна точка.*

На рис. 5 вектор  $n$  – орт нормалі до площини орбіти супутника  $OAC$ , вісь  $Z_1$  співпадає з вектором  $k$  (де  $k$  – одиничний вектор осі диполя, паралельний його магнітному моменту), вісь  $X_1$  спрямована у висхідний вузол орбіти супутника на площині геомагнітного екватора  $OBC$ . Положення осі диполя визначено кутами  $\delta_1 = 11,5^\circ$  і  $\delta_2$ , які визначають положення диполя відносно Землі. Кут  $\lambda_2 = \omega_3 t + \lambda_{20}$  ( $\omega_3$  – кутова швидкість обертання Землі,  $\lambda_{20}$  – стала),  $\tilde{i}$  – кут між осями  $z$  і  $Z_1$ ,  $u_1$  – кут від від’ємного напрямку осі  $X_1$  до вектора  $R$ , який необхідно відраховувати проти часової стрілки, якщо дивитись з кінця осі  $z$ .

Вісь  $\xi_0$  спрямована у висхідний вузол геомагнітного екватора в площині  $XOY$ . Осі  $y$  і  $Y_1$  на рис. 5 не зображені.

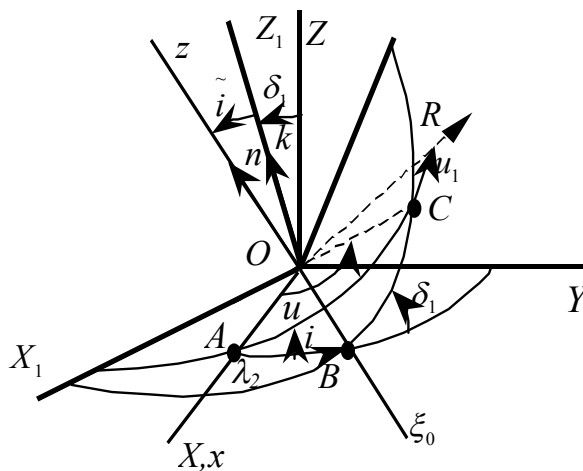


Рис. 5. Системи координат при русі супутника по орбіті (модель геомагнітного поля – „косий диполь”)

У моделі „похилий диполь” вектор  $H$ , його проекції на геомагнітні осі  $X_1, Y_1, Z_1$  та модуль описують таким чином [5, 13, 14]:

$$H = \frac{\mu_e}{R^5} (3(k \cdot R)R - kR^2);$$

$$H_{X_1} = -\frac{3\mu_e}{2R^3} \sin \tilde{i} \sin 2u_2;$$

$$H_{Y_1} = -\frac{3\mu_e}{2R^3} \sin 2\tilde{i} \sin u_2^2;$$

$$H_{Z_1} = \frac{\mu_e}{R^3} (1 - 3\sin^2 \tilde{i} \sin^2 u_2),$$

$$|H| = \frac{\mu_e}{R^3} \sqrt{1 + 3\sin^2 \tilde{i} \sin^2 u_2},$$

де  $R$  – відстань від центра Землі до точки, в якій розраховується напруженість;

кут  $u_2 = u_1 + \pi$  – аргумент широти супутника щодо площини геомагнітного екватора;

$\mu_e$  – стала земного магнетизму (модуль магнітного моменту).

*Магнітний момент супутника.*

Якщо намагнічене тіло знаходиться в магнітному полі напруженості  $H$ , то на це тіло буде діяти момент сил, який визначається таким чином [15]:

$$M = H \times I,$$

де  $I$  – магнітний момент тіла.

Розглянемо магнітний момент, діючий на супутник, який виникає як через наявність на ньому електричних кіл і постійних магнітів, так і через намагнічування матеріалу, з якого виготовлений супутник. Визначення точного значення магнітного моменту супутника являє собою складну задачу як з теоретичної [15, 16, 17], так і з практичної точки зору [18]. Окремі складові магнітного поля можна з достатньою мірою точності вважати такими, що не залежать від зовнішнього магнітного поля і орієнтації супутника, наприклад магнітні моменти постійних магнітів та діючих електричних кіл. Інші складові суттєво залежать від зовнішнього поля і орієнтації супутника, наприклад наведений магнітний момент та магнітний момент, викликаний струмами Фуко. Оскільки зовнішнє магнітне поле близьке до однорідного, магнітний момент  $I_n$ , який виникає за рахунок намагнічування супутника в зовнішньому полі, можна описати таким чином [16]:

$$I_n = A_{1H} H, \tag{11}$$

а момент від вихрових струмів так:

$$I_\phi = A_{2H} \frac{dH^*}{dt}, \tag{12}$$

де індекс (\*) при похідній означає локальну похідну від вектора в системі координат, жорстко пов'язаній із супутником. У роботі [16] також обговорюються питання обчислення матриць  $A_{2H}, A_{1H}$ .

Якщо супутник, наприклад, являє собою відносно довге тіло, яке намагнічується в магнітному полі вздовж своєї осі симетрії, наведений магнітний момент буде пропорційним проекції вектора напруженості зовнішнього поля на вісь симетрії тіла. У роботі [19] замість формули (11) запропонована формула для обчислення наведеного магнітного моменту із врахуванням складової магнітного моменту, яка спрямована вздовж осі симетрії супутника:

$$I_n = \frac{\mu^* - 1}{4\pi} v (H \cdot k) k,$$

де  $\mu^*$  – магнітна проникливість супутника вздовж його осі симетрії;

$v$  – об'єм корпусу супутника;

$(H \cdot k)$  – скалярний добуток векторів  $H$  і  $k$ .

$k$  – орт осі симетрії супутника.

Струми Фуко виникають у тілі, якщо останнє перетинає силові лінії магнітного поля. Будемо вважати, що в тілі супутника вихрові струми виникають тільки за рахунок складової абсолютної кутової швидкості, ортогональної до вектора напруженості геомагнітного поля. Магнітний момент, який виникає у цьому випадку, намагається зменшити цю складову кутової швидкості. Враховуючи, що магнітний

момент від вихрових струмів пропорційний напруженості зовнішнього поля та швидкості його зміни, автор [19] пропонує замість виразу (12) використовувати наступну формулу:

$$I_{\phi} = k_{\phi} \left( \omega \times H - \frac{d^* H}{dt} \right), \quad (13)$$

де  $k_{\phi}$  – постійний коефіцієнт, який залежить від форми та матеріалу, з якого виготовлений супутник;

$\omega$  – абсолютна кутова швидкість обертання супутника навколо свого центра мас.

При досить великій швидкості обертання супутника вираз (13) перетворюється в наступний:

$$I_{\phi} = k_{\phi} \omega \times H .$$

### Висновки.

1. Величини збурювальних моментів залежать від геометричної форми супутника та матеріалу корпусу.
2. Залежно від висоти та форми супутника можна не враховувати окремі збурювальні моменти, які діють на супутник:
  - моменти від ударів метеоритів;
  - на висоті більше 2000 км – аеродинамічний момент (який значно менший від гравітаційного моменту, моменту від тиску сонячного повітря та моменту від внутрішніх мас, що рухаються);
  - момент від тиску сонячного повітря (якщо супутник має форму диска, останній при певній орієнтації має мінімальну поверхню, на яку „тисне” сонячне випромінювання).
3. Можна не враховувати магнітний момент, який викликаний зовнішніми струмами іоносфери.
4. Для розрахунків магнітного поля у будь-який момент часу необхідно враховувати також часові варіації поля.
5. При орієнтації супутника за допомогою магнітоприводу аналітичний вираз магнітного поля необхідно знати з двох причин:
  - для отримання „прогнозних” моделей геомагнітного поля, яке впливає на орієнтацію супутника (в залежності від форми, матеріалу корпусу, кутового положення та траєкторії супутника);
  - для обрахування моменту, який повинні створювати силові котушки для керування орієнтацією супутника.
6. Для визначення складових вектора напруженості магнітного поля, яке діє на супутник, спочатку необхідно визначити модуль та напрямок вектора залежно від траєкторії супутника (ШСЗ–матеріальна точка), а після цього визначити проекції вектора напруженості геомагнітного поля на осі супутника (ШСЗ–тверде тіло).
7. При наявності на борту супутника високоточних магнітометрів можливе використання наближеної моделі геомагнітного поля, яке буде коригуватися при русі супутника по орбіті.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Самотокін Б.Б., Шостачук Д.М., Шостачук А.М.* Оцінка ефективності способу орієнтації штучних супутників землі // Вісник ЖДТУ. – № 1 (36). – С. 88–95.
2. *Робертсон Р.* Проблемы стабилизации положения спутника // Управление полетом космических аппаратов. – М.: Изд-во иностр. литературы. – С. 249–283.
3. *Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г.* Управление космическим летательным аппаратом. – М.: Машиностроение. – 1964. – 404 с.
4. *Stafford R.L.* Preliminary considerations for attitude control of space vehicles, American Astronautical Society, Third Annual Uest Coast Meeting, Vlw, 1960.
5. *Паркинсон У.* Введение в геомагнетизм: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 528 с.
6. *Самотокін Б.Б., Мелешко В.В., Степанковський Ю.В.* Навігаційні прилади та системи. – К.: Выща школа, 1986. – 344 с.
7. *Бесекерський В.А., Иванов В.А., Самотокін Б.Б.* Орбитальное гироскопирование. – С.-Петербург: Политехника, 1993. – 256 с.
8. *Хентов А.А.* Пассивная стабилизация искусственных спутников по магнитному полю Земли. – Космические исследования. – Т. 5. – 1967. – № 4.
9. *Самотокін Б.Б., Шостачук Д.М.* Спосіб орієнтації штучних супутників Землі / Деклараційний патент на винахід // Промислова власність. Офіційний бюлетень № 4. – 2003 р.
10. *Адам Н.В. и др.* Сферический анализ геомагнитного поля на эпохи 1955 1958 гг. // Геомагнетизм и аэрономия. – № 5. – Т. 2. – 1962.
11. *Тюрмина Л.О.* Описание главного магнитного поля Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – Т. 12. – № 4. – 1972.



12. Боевкин В.И., Гуревич Ю.Г., Павлов Ю.Н., Толстоусов Г.Н. Ориентация искусственных спутников в гравитационных и магнитных полях. – М.: Наука, 1976. – 304 с.
13. Белецкий В.В., Хентов А.А. Вращательное движение намагниченного спутника. – М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. Литературы, 1985 – 288 с.
14. Ландау Л.В., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1967.
15. Ландау Л.В., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Физматгиз, 1959.
16. Голубков В.В. Вычисление момента сил, действующих на тело в магнитном поле. – М.: Препринт Ин-та прикладной математики АН СССР, 1971. – № 50.
17. Линьков Р.В., Урман Ю.М. Силы и моменты, действующие на проводящую оболочку, вращающуюся в магнитном поле. // Журнал технической физики, – № 5.– Т. 47. – 1977.
18. Гехт Е., Мэнджер У. Магнитная система управления угловым движением спутников серии “Тайрос”. В кн.: Проблемы ориентации искусственных спутников Земли. – М.: Наука, 1966.
19. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. – М.: Наука, 1965.
20. Проблемы ориентации искусственных спутников Земли / Под ред. С.Ф. Сингера. – М.: Наука, 1966.

САМОТОКІН Борис Борисович – доктор технічних наук, професор, проректор з міжнародних зв'язків Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- автоматичне керування технічними системами.

ШОСТАЧУК Дмитро Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- магнітометричні системи орієнтації штучних супутників Землі;
- методи оптимізації;
- математичне моделювання на ЕОМ.

ШОСТАЧУК Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- механіка деформівного твердого тіла;
- теорія пружності.

Подано 13.05.2006

**Самотокін Б.Б., Шостачук Д.М., Шостачук А.М.** Орієнтація штучного супутника Землі в геомагнітному полі

**Самотокін Б.Б., Шостачук Д.Н., Шостачук А.Н.** Ориентация искусственного спутника Земли в геомагнитном поле

**Samotokin B.B., Shostachuk D.N., Shostachuk A.N.** Artificial Earth satellite orientation in the geomagnetic field

УДК 629.7.05

**Орієнтація штучного супутника Землі в геомагнітному полі. Б.Б. Самотокін, Д.М. Шостачук, А.М. Шостачук**

В статті проаналізовано вплив основних збудовальних моментів, які діють на супутник, залежність їх від висоти польоту, зроблений аналіз геомагнітного поля та визначені аналітичні вирази для складових головного магнітного поля Землі з урахуванням векторних варіацій поля, а також складових діючого на супутник магнітного моменту.

УДК 629.7.05

**Самотокін Б.Б., Шостачук Д.Н., Шостачук А.Н.** Ориентация искусственного спутника Земли в геомагнитном поле.

В статье проанализировано влияние основных возмущающих моментов, действующих на спутник, зависимость их от высоты полета, сделан анализ геомагнитного поля и определены аналитические выражения для составляющих магнитного поля Земли с учетом векторных вариаций поля, а также составляющих действующего на спутник магнитного момента.

УДК 629.7.05

**Samotokin B.B., Shostachuk D.N., Shostachuk A.N.** Artificial Earth satellite orientation in the geomagnetic field.

The influence of the essential excitation moments acting on the satellite and their dependence from the fly height is analyzed in this article. The analysis of the geomagnetic field is done. The analytical expressions for the Earth magnetic field components, taking into consideration of the vector field variations and of the magnetic moment components acting on the Earth satellite are defined.