

7. **Карпович Е. В.** Определение диаметра круговых колебаний электронного луча при сварке цилиндрических деталей из титановых сплавов / Е. В. Карпович, С. А. Чернецкий, Е. А. Джур, В. Г. Бессалый // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки : зб. наук. пр. – Д. : Пороги, 2011. – Т. XI. – С. 79–88. – ISBN 978-617-518-167-6.

*Надійшла до редколегії 27.06.2017*

УДК 629.78

**О. В. Луць, А. А. Манойленко**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УГЛОВЫХ МАНЕВРОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ СТЕРЕОСЪЕМКИ УЧАСТКОВ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ**

Предложена методика расчета параметров программного углового движения космического аппарата (КА) в трассовом стереоскопическом режиме съемки участков поверхности Земли, расположенных на заданном расстоянии от следа трассы КА.

*Ключевые слова:* космический аппарат, стереосъемка, угловое движение.

Запропоновано методику розрахунку параметрів програмного кутового руху космічного апарата (КА) в трасовому стереоскопічному режимі зйомки ділянок поверхні Землі, розташованих на заданій відстані від сліду траси КА.

*Ключові слова:* космічний апарат, стереозйомка, кутовий рух.

The method of calculating the parameters of the spacecraft angular motion while shooting the Earth's surface, located at a predetermined distance from the track satellites route, in stereoscopic mode.

*Keywords:* spacecraft, stereo imaging, angular motion.

**Введение.** При помощи дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса можно решать ряд задач, например, определять высоты объектов, расположенных на Земле, по информации, полученной от КА. В этом случае обрабатывают снимки одного и того же участка поверхности Земли, полученные при его съемке под разными углами отклонения КА от направления в надири (стереопары).

**Постановка задачи.** Требуется получить математическую модель, по которой, задав необходимые исходные данные, можно рассчитать программные углы отклонений КА по тангажу, крену и рысканию, угловые скорости и угловые ускорения КА в этих каналах управления, обеспечивающие требуемый режим стереосъемки.

**Исходные положения и допущения [3; 4].** При разработке методики расчета параметров программного углового движения КА вокруг центра масс учитывались следующие исходные положения и допущения:

– время отсчитывается от момента прохождения КА восходящего узла витка орбиты, на котором производится съемка;

- стереоізображення участка поверхності Землі формується путем послідовального отримання двох ізображень участка із різних точок одного і того ж витка орбіти КА;
- при розрахунок параметрів кутових маневрів КА враховується зміщення знімаемого участка відносно траси за рахунок вращення Землі;
- при розрахунок часу отримання кожного ізображення складаючої лінійної швидкості руху КА відносно знімаемого участка за рахунок вращення Землі приймається постійною;
- кожне ізображення участка формується за рахунок орбітального руху КА путем послідовального отримання рядків ізображення з допомогою лінійки чутливих елементів оптичної корисної навантаження КА;
- оптична корисна навантаження КА жорстко пов'язана з корпусом КА, а її наведення для виконання стереозйомки участка Землі здійснюється за рахунок виконання програмного руху КА навколо центра мас;
- при отриманні кожного ізображення стереопари програмні кути орієнтації КА по тангажу, крену, рысканню залишаються постійними;
- модель Землі представляє собою сферу радіусом  $R_Z = 6371$  км;
- вращення Землі навколо своєї осі відбувається з постійною кутовою швидкістю  $\omega_Z = 7,29211 \cdot 10^{-5}$  рад / с;
- рух центра мас КА по орбіті приймається рівномірним;
- управління КА оптимальне по часу, процес переорієнтації КА відбувається без коливань і затухань.

**Исходные данные.** Для розрахунок параметрів програмного кутового руху КА навколо центра мас при проведенні трасової стереозйомки участка Землі використовуються наступні вихідні дані:

$h$  – висота орбіти КА;

$i$  – нахил орбіти КА;

$u$  – аргумент широти КА в висхідному вузлі орбіти;

$Lu$  – довжина знімаемого участка Землі;

$\delta_z$  – географічна широта центра знімаемого участка Землі;

$p$  – відстань від сліду траси КА (СТ) до центра участка Землі ("+" в разі, коли центр участка розташований зліва відносно СТ КА або на СТ КА, "-" в разі, коли центр участка Землі розташований справа відносно СТ КА);

$\vartheta = \{\vartheta_i\}$  – масив дискретних значень кута відхилення КА по тангажу;

$t = \{t_i\}$  – масив дискретних значень часу переорієнтації КА по тангажу.

**Основные выражения, используемые для проведения численных расчетов [1; 2]:**

1) Час переорієнтації КА в каналі тангажу, відповідний необхідному куту переорієнтації:

$$W(q) = \text{interp}(\text{CSW}, \vartheta, t, X(q)), \quad (1)$$

де  $q = (0 \text{ deg}, 0,001 \text{ deg}, 70 \text{ deg})$  – значення кута тангажу від 0 до 70 градусів дискретністю 0,001 градус;

$\text{CSW} = \text{pspline}(\vartheta, t)$  – апроксимуюча функція дискретних значень кута переорієнтації КА в каналі тангажу від часу переорієнтації.

Стандартна функція  $\text{CSW}$  повертає вектор коефіцієнтів других похідних для апроксимуючої кривої кута тангажу, який використовується в стандартній функції "interp".

Аргументи  $\vartheta$  і  $t$  повинні бути вещественними векторами однакової довжини. Значення в масиві  $\vartheta$  повинні бути вещественними і розташованими в порядку зростання.

Функция "pspline" генерирует кривую сплайна, которая приближается к параболе в граничных точках.

Функция  $W(q)$  возвращает интерполируемое значение угла  $q$ , соответствующее аргументу  $X(q)$ .

Вектор CSW формируется на основе векторов данных  $\vartheta$  и  $t$  функции "pspline".

2) Аргумент широты КА в восходящем узле орбиты:

$$u - z = \pi - \arcsin\left(\frac{\sin(\delta - z)}{\sin(I)}\right) \quad (2)$$

3) Расстояние от центра Земли до центра масс КА:

$$r = Rz + h \quad (3)$$

4) Скорость вращения Земли относительно орбиты КА:

$$\omega = -\omega_z \quad (4)$$

5) Угловая скорость орбитального движения КА:

$$du = \sqrt{\frac{\mu}{r^3}}, \quad (5)$$

где  $\mu = 3,986005 \cdot 10^{14} \text{ м}^3 / \text{с}^2$  – гравитационный параметр Земли.

6) Линейная скорость движения центра масс КА:

$$V_{ka} = du \cdot r \quad (6)$$

7) Угол между касательной к трассе КА и плоскостью орбиты:

$$Ad = \arctg\left(\frac{\omega_z \sin(I) \cos(u - z)}{du - \omega_z \cos(I)}\right) \quad (7)$$

8) Линейная скорость движения подспутниковой точки:

$$V_c = du \cdot \frac{Rz}{\cos(Ad)} \quad (8)$$

9) Момент времени, соответствующий минимальному угловому расстоянию между радиус-векторами центра масс КА и центра снимаемого участка Земли:

$$t - z = \frac{(u - z - u)}{du} \quad (9)$$

10) Время съемки участка Земли:

$$\delta t = \frac{Lu}{V_c} \quad (10)$$

11) Угол, на который необходимо повернуть КА по тангажу, чтобы обеспечить съемку участка Земли заданной длины:

$$\text{pitch} = \text{root}\left[\frac{[-Lu + 2 \cdot Rz \cdot (\arcsin\left(\frac{h + Rz}{Rz} \cdot \sin(x)\right) - x)]}{V_c} - W(2 \cdot x), x\right], \quad (11)$$

где root – оператор нахождения корня уравнения;  $x$  – аргумент уравнения;  $W(2 \cdot x)$  – функция, описывающая зависимость изменения времени поворота КА по тангажу от угла тангажа. Здесь аргумент удваивается ( $2 \cdot x$ ), так как перенацеливание КА осуществляется по тангажу на угол от "- 9°" до "+ 9°".

12) Угол, на который необходимо повернуть КА по крену, чтобы обеспечить съемку участка Земли:

$$P = \arctg \left( Rz \cdot \frac{\sin\left(\frac{P}{Rz}\right)}{r - Rz \cdot \cos\left(\frac{P}{Rz}\right)} \right) \quad (12)$$

13) Время съёмки участка Земли, необходимое для получения первого снимка стереопары:

$$T_1 = \delta t \quad (13)$$

14) Время перенацеливания КА, необходимое для получения второго снимка стереопары:

$$T_2 = W(2 \cdot x) \quad (14)$$

15) Время съёмки участка Земли, необходимое для получения второго снимка стереопары:

$$T_3 = \delta t \quad (15)$$

16) Время стереосъёмки:

$$ts = 2 \cdot \delta t + T_2 \quad (16)$$

17) Время начала съёмки участка Земли для получения первого снимка стереопары, отсчитываемое от момента прохождения КА восходящего узла траектории:

$$tn1 = t_z - \frac{ts}{2} \quad (17)$$

18) Время окончания съёмки участка Земли для получения первого снимка стереопары, отсчитываемое от момента прохождения КА восходящего узла траектории:

$$tk1 = tn1 + \delta t \quad (18)$$

19) Время окончания съёмки участка Земли для получения второго снимка стереопары, отсчитываемое от момента прохождения КА восходящего узла траектории:

$$tk2 = t_z + \frac{ts}{2} \quad (19)$$

20) Время начала съёмки участка Земли для получения второго снимка стереопары, отсчитываемое от момента прохождения КА восходящего узла траектории:

$$tn2 = tk2 - \delta t \quad (20)$$

21) Количество точек численного расчета, необходимое для получения каждого изображения стереосъёмки:

$$m = \frac{Lu}{100} \quad (21)$$

22) Шаг между точками численного расчета:

$$c_n = 100 \cdot n, \quad n = 1..m \quad (22)$$

23) Время, необходимое для прохождения пути КА от начала снимаемого участка до  $n$ -ой точки съёмки:

$$t1_n = \frac{c_n - 100}{Vc} \quad (23)$$

24) Аргумент широты КА на широте начала съёмки участка:

$$ud0_n = du \cdot (t1_n + t_z - \frac{ts}{2}) \quad (24)$$

25) Координаты центра проекции  $n$ -й строки изображения в связанной системе координат:

$$AL = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ Rz \end{vmatrix}, RR = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{vmatrix} \quad (25)$$

26) Координаты центра проекции  $n$ -й строки изображения в относительной орбитальной системе координат:

$$ARC = AL - RR \quad (26)$$

27) Угол между касательной к трассе КА и плоскостью орбиты КА в момент времени  $t_n$ :

$$\Delta Ad_n = \arctg[\omega z \cdot \sin(I) \cdot \frac{\cos(ud0_n)}{(du - \omega z \cdot \cos(I))}] \quad (27)$$

28) Матрица перехода от относительной орбитальной системы координат к орбитальной системе координат в момент времени  $t_n$ :

$$AOC_n = \begin{vmatrix} \cos(\Delta Ad_n) & -\sin(\Delta Ad_n) & 0 \\ \sin(\Delta Ad_n) & \cos(\Delta Ad_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot ARC \quad (28)$$

29) Гринвичская долгота восходящего узла орбиты КА в момент времени  $t_n$ :

$$\lambda\Omega_n = \omega \cdot (t_z - \frac{ts}{2} + t_n) \quad (29)$$

30) Компоненты матрицы перехода от орбитальной системы координат к гринвичской системе координат:

$$B1_n = \begin{vmatrix} \cos(\lambda\Omega_n) & \sin(\lambda\Omega_n) & 0 \\ -\sin(\lambda\Omega_n) & \cos(\lambda\Omega_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (30)$$

$$B2_n = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(I) & \sin(I) \\ 0 & -\sin(I) & \cos(I) \end{vmatrix}, \quad (31)$$

$$B3_n = \begin{vmatrix} \cos(ud0_n) & \sin(ud0_n) & 0 \\ -\sin(ud0_n) & \cos(ud0_n) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (32)$$

$$B4_n = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & -\sin(\frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{vmatrix}, \quad (33)$$

$$B5_n = \begin{vmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & 0 & -\sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{vmatrix}, \quad (34)$$

$$Bt_n = B5_n \cdot B4_n \cdot B3_n \cdot B2_n \cdot B1_n, \quad (35)$$

$$AGC_n = Bt_n^T \cdot (AOC_n + RR), \quad (36)$$

$$B6_n = \begin{vmatrix} \cos(\lambda\Omega_{(n,j)}) & \sin(\lambda\Omega_{(n,j)}) & 0 \\ -\sin(\lambda\Omega_{(n,j)}) & \cos(\lambda\Omega_{(n,j)}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (37)$$

$$B7_{(n,j)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(I) & \sin(I) \\ 0 & -\sin(I) & \cos(I) \end{vmatrix}, \quad (38)$$

$$B8_{(n,j)} = \begin{vmatrix} \cos(U1_{(n,j)}) & \sin(U1_{(n,j)}) & 0 \\ -\sin(U1_{(n,j)}) & \cos(U1_{(n,j)}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (39)$$

$$B9_{(n,j)} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) & \sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & -\sin(\frac{\pi}{2}) & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{vmatrix}, \quad (40)$$

$$B10_{(n,j)} = \begin{vmatrix} \cos(\frac{\pi}{2}) & 0 & -\sin(\frac{\pi}{2}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2}) & 0 & \cos(\frac{\pi}{2}) \end{vmatrix}, \quad (41)$$

$$Bt_{(n,j)} = B10_{(n,j)} \cdot B9_{(n,j)} \cdot B8_{(n,j)} \cdot B7_{(n,j)} \cdot B6_{(n,j)}, \quad (42)$$

$$\begin{pmatrix} X_{-oij(n,j)} \\ Y_{-oij(n,j)} \\ Z_{-oij(n,j)} \end{pmatrix} = B_{(n,j)} \cdot AGC_n - RR \quad (43)$$

31) Аргумент широты КА в момент времени  $t_n$ :

$$U1_{(n,j)} = tt2_{(n,j)} \cdot du, \quad (44)$$

где  $j = 0, 1$  – индекс (номер) первого и второго снимков соответственно.

32) Геоцентрическая широта КА в момент времени  $t_n$ :

$$\phi_{ka(n,j)} = \arcsin[\sin(U1_{(n,j)}) \cdot \sin(I)] \quad (45)$$

33) Время начала съемки для получения первого и второго изображений стереопары:

$$tt2_{(n,j)} = t1_n + tz - \frac{ts}{2} + (2 \cdot j - 1) \cdot \left(\frac{ts}{2} - \frac{\delta t}{2}\right) \quad (46)$$

34) Гринвичская долгота восходящего узла орбиты КА в момент времени  $t_n$ :

$$\lambda\Omega_{(n,j)} = \omega \cdot tt2_{(n,j)} \quad (47)$$

35) Угол ориентации КА по тангажу:

$$\vartheta_{(n,j)} = \arctg\left(\frac{X_{-oij(n,j)}}{Z_{-oij(n,j)}}\right), \quad (48)$$

где  $X, Y, Z$  – координаты центра масс КА.

36) Скорости изменения координат центра масс КА:

$$DX_{-oij(n,j)} = \omega \cdot [Y_{-oij(n,j)} \cdot \sin(i) \cdot \sin(U1_{(n,j)}) - (Z_{-oij(n,j)}) \cdot \cos(i)] - du \cdot [Z_{-oij(n,j)}], \quad (49)$$

$$DY_{-oij(n,j)} = \omega \cdot [(Z_{-oij(n,j)}) \cdot \sin(i) \cdot \cos(U1_{(n,j)}) - X_{-oij(n,j)} \cdot \sin(i) \cdot \sin(U1_{(n,j)})], \quad (50)$$

$$DZ_{-oij(n,j)} = \omega \cdot [X_{-oij(n,j)} \cdot \cos(i) - Y_{-oij(n,j)} \cdot \sin(i) \cdot \cos(U1_{(n,j)})] + du X_{-oij(n,j)}, \quad (51)$$

37) Угол ориентации КА по крену:

$$\phi_{(n,j)} = \arctg\left[-\frac{Y_{-oij(n,j)}}{Z_{-oij(n,j)}} \cdot \cos(\vartheta_{(n,j)})\right] + P, \quad (52)$$

где  $P$  – угол, соответствующий расстоянию от СТ КА до центра снимаемого участка Земли.

38) Угол ориентации КА по рысканию:

$$\Psi_{(n,j)} = \frac{DX_{-oij(n,j)} \cdot \sin(\vartheta_{(n,j)}) \cdot \sin(\phi_{(n,j)}) + DY_{-oij(n,j)} \cdot \cos(\phi_{(n,j)}) + DZ_{-oij(n,j)} \cdot \cos(\vartheta_{(n,j)}) \cdot \sin(\phi_{(n,j)})}{DX_{-oij(n,j)} \cdot \cos(\vartheta_{(n,j)}) - DZ_{-oij(n,j)} \cdot \sin(\vartheta_{(n,j)})} \quad (53)$$

39) Угловая скорость КА по рысканию:

$$d\psi(n, j) = \frac{\psi(n, j) - \psi(n - 1, j)}{\Delta t} \quad (54)$$

40) Угловое ускорение КА по рысканию:

$$dd\psi(n, j) = \frac{d\psi(n, j) - d\psi(n - 1, j)}{\Delta t} \quad (55)$$

41) Время перенацеливания КА с шагом, равным 1 с:

$$t_0 = tk1, tk1 + 1..tn2 \quad (56)$$

42) Начальная угловая скорость КА по тангажу:

$$dO_{-n} = \frac{d\Theta_{(m,0)}}{dtk1} \quad (57)$$

43) Конечная угловая скорость КА по тангажу:

$$dO_{-k} = \frac{d\Theta_{(1,1)}}{dtn2} \quad (58)$$

44) Угловое ускорение КА по тангажу:

$$\text{if } tv \leq (tk1 + \frac{T_2}{2}), \text{ then } \frac{4 \cdot (\Theta_{(1,1)} - \Theta_{(m,0)})}{T_2^2} - \frac{dO_{-k} + 3 \cdot dO_{-n}}{T_2}$$

$$\text{else } -\frac{4 \cdot (\Theta_{(1,1)} - \Theta_{(m,0)})}{T_2^2} + \frac{3 \cdot dO_{-k} + dO_{-n}}{T_2} \quad (59)$$

45) Угловая скорость КА по тангажу на середине участка перенацеливания:

$$dOS = dO_{-n} + ddO(tk1) \cdot (tr_{-2} - tk1) \quad (60)$$

46) Угол ориентации КА по тангажу на середине участка перенацеливания:

$$OS = \Theta_{(m,0)} + dO_{-n} \cdot (\frac{T_2}{2}) + \frac{ddO(tk1) \cdot (\frac{T_2}{2})^2}{2} \quad (61)$$

47) Угловая скорость перенацеливания КА по тангажу на середине участка перенацеливания:

$$\text{if } tv \leq (tk1 + \frac{tr}{2}), \text{ then } dO_{-n} + ddO(tv) \cdot (tv - tk1)$$

$$\text{else } dOS + ddO(tv) \cdot (tv - tr_{-2}) \quad (62)$$

48) Угол перенацеливания КА по тангажу на середине участка перенацеливания:

$$\text{if } tv \leq (tk1 + \frac{tr}{2}), \text{ then } \Theta_{(m,0)} + dO_{-n} \cdot (tv - tk1) + \frac{ddO(tv - tk1)^2}{2}$$

$$\text{else } OS + dOS(tv - tr_{-2}) + \frac{ddO(tv) \cdot (tv - tr_{-2})^2}{2} \quad (63)$$

49) Начальная угловая скорость КА по крену:

$$d\Phi_{-n} = \frac{d\varphi_{(m,0)}}{dtk1} \quad (64)$$

50) Конечная угловая скорость КА по крену:

$$d\Phi_{-k} = \frac{d\varphi_{(1,1)}}{dtn2} \quad (65)$$

51) Угловое ускорение КА по крену:

$$\text{if } tv \leq (tk1 + \frac{T_2}{2}), \text{ then } \frac{4 \cdot (\varphi_{(1,1)} - \varphi_{(m,0)})}{T_2^2} - \frac{d\Phi_{-k} + 3 \cdot d\Phi_{-n}}{T_2}$$

$$\text{else } -\frac{4 \cdot (\varphi_{(1,1)} - \varphi_{(m,0)})}{T_2^2} + \frac{3 \cdot d\Phi_{-k} + d\Phi_{-n}}{T_2} \quad (66)$$

52) Угловая скорость КА по крену на середине участка перенацеливания:



$$d\Phi S = d\Phi_{-n} + dd\Phi(tk1) \cdot (tr_{-2} - tk1) \quad (67)$$

53) Угол ориентации КА по крену на середине участка перенацеливания:

$$\Phi S = \varphi_{(m,0)} + d\Phi_{-n} \cdot \left(\frac{tr}{2}\right) + \frac{dd\Phi(tk1) \cdot \left(\frac{tr}{2}\right)^2}{2} \quad (68)$$

54) Угловая скорость перенацеливания КА по крену на середине участка перенацеливания:

$$\text{if } tv \leq \left(tk1 + \frac{tr}{2}\right), \text{ then } d\Phi_{-n} + dd\Phi(tv) \cdot (tv - tk1)$$

$$\text{else } d\Phi S + dd\Phi(tv) \cdot (tv - tr_{-2}) \quad (69)$$

55) Угол перенацеливания КА по крену на середине участка перенацеливания:

$$\text{if } tv \leq \left(tk1 + \frac{tr}{2}\right), \text{ then } \varphi_{(m,0)} + d\Phi_{-n} \cdot (tv - tk1) + \frac{dd\Phi(tv - tk1)^2}{2}$$

$$\text{else } \Phi S + d\Phi S(tv - tr_{-2}) + \frac{dd\Phi(tv) \cdot (tv - tr_{-2})^2}{2} \quad (70)$$

56) Начальная угловая скорость КА по рысканию:

$$d\Psi_{-n} = d\psi_{(m,0)} \quad (71)$$

57) Конечная угловая скорость КА по рысканию:

$$d\Psi_{-k} = d\psi_{(2,1)} \quad (72)$$

58) Угловое ускорение КА по рысканию:

$$\text{if } tv \leq \left(tk1 + \frac{T_2}{2}\right), \text{ then } \frac{4 \cdot (\Psi_{(2,1)} - \Psi_{(m,0)})}{T_2^2} - \frac{d\Psi_{-k} + 3 \cdot d\Psi_{-n}}{T_2}$$

$$\text{else } -\frac{4 \cdot (\Psi_{(2,1)} - \Psi_{(m,0)})}{T_2^2} + \frac{3 \cdot d\Psi_{-k} + d\Psi_{-n}}{T_2} \quad (73)$$

59) Угловая скорость КА по рысканию на середине участка перенацеливания:

$$d\Psi S = d\Psi_{-n} + dd\Psi(tk1) \cdot (tr_{-2} - tk1) \quad (74)$$

60) Угол ориентации КА по рысканию на середине участка перенацеливания:

$$\Psi S = \psi_{(m,0)} + d\Psi_{-n} \cdot \left(\frac{T_2}{2}\right) + \frac{dd\Psi(tk1) \cdot \left(\frac{T_2}{2}\right)^2}{2} \quad (75)$$

61) Угловая скорость перенацеливания КА по рысканию на середине участка перенацеливания:

$$\text{if } tv \leq \left(tk1 + \frac{tr}{2}\right), \text{ then } d\Psi_{-n} + dd\Psi(tv) \cdot (tv - tk1)$$

$$\text{else } d\Psi S + dd\Psi(tv) \cdot (tv - tr_{-2}) \quad (76)$$

62) Угол перенацеливания КА по рысканию на середине участка перенацеливания:

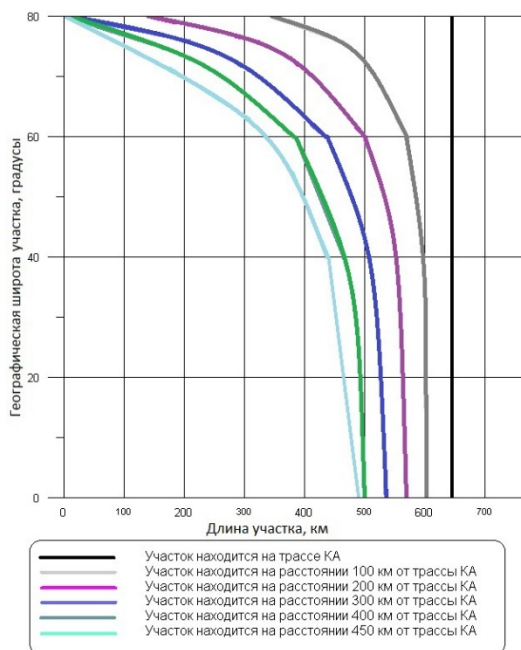
$$\begin{aligned} & \text{if } tv \leq (tk1 + \frac{T_2}{2}), \text{ then } \Psi_{(m,0)} + d\Psi_{-n} \cdot (tv - tk1) + \frac{dd\Psi(tv - tk1)^2}{2} \\ & \text{else } \Psi_S + d\Psi_S(tv - tr_{-2}) + \frac{dd\Psi(tv) \cdot (tv - tr_{-2})^2}{2} \end{aligned} \quad (77)$$

**Результаты моделирования.** С использованием выражений, приведенных выше, проведено численное моделирование в среде MathCAD процесса стереосъемки участка Земли.

На рис. 1 представлена зависимость максимальной длины снимаемого участка Земли от географической широты центра снимаемого участка и расстояния от центра участка до СТ КА.

Расчеты проведены для следующих условий:

- высота орбиты КА – 650 км;
- наклонение орбиты КА – 98 град.;
- аргумент широты КА в восходящем узле орбиты – 60 град.;
- время перенацеливания КА в канале тангажа на 70 градусов – 45 с;
- длина снимаемого участка – от 20 км до 650 км;
- расстояние от СТ КА до центра снимаемого участка – от 0 до 450 км;
- географическая широта центра снимаемого участка – от 0 до  $\pi - i$  град.



**Рис. 1. Зависимость максимальной длины снимаемого участка Земли от географической широты центра участка и расстояния от центра участка до СТ КА**

Из рис. 1 следует, что максимальная длина снимаемого участка зависит от географической широты центра этого участка и расстояния от центра участка до СТ КА. Очевидно, что в случае расположения участка на трассе КА географическая широта центра этого участка не влияет на максимальную длину

снимаемого участка, а длина участка ограничивается лишь угловой скоростью перенацеливания КА.

В случае расположения участка на некотором расстоянии от следа трассы КА (особенно это заметно при расположении участка на географической широте более 45 град.):

- угол между СТ КА и географической параллелью, на которой расположен снимаемый участок Земли, уменьшается;
- вектор линейной скорости движения поверхности Земли и вектор орбитальной скорости КА стремятся быть параллельными, что достигается на широте участка  $\pi - i$  град, но направлены они в противоположные стороны.

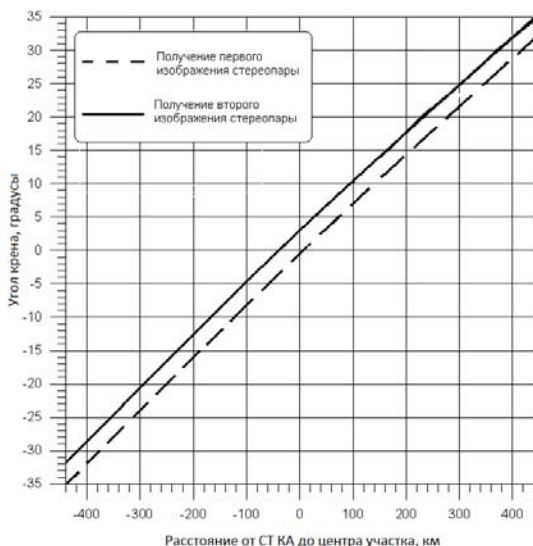
Можно сделать вывод также о том, что чем больше географическая широта участка и чем больше расстояние от участка до следа трассы КА, тем меньшей длины участок можно снять в режиме стереосъемки.

В частности, если участок расположен на расстоянии 450 км от следа трассы, то максимальная географическая широта участка, позволяющая провести стереосъемку, составит 76 град (для участка длиной 50 км). На широте участка близкой к  $\pi - i$  град стереосъемку участка осуществить невозможно.

На рис. 2 представлена зависимость программного угла поворота КА по крену от расстояния между центром участка и СТ КА.

Расчеты проведены для случая расположения снимаемого участка слева и справа от СТ КА при следующих условиях:

- высота орбиты КА – 650 км;
- наклонение орбиты КА – 98 град.;
- аргумент широты КА в восходящем узле орбиты – 60 град.;
- время перенацеливания КА в канале тангажа на 70 градусов – 45 с;
- длина снимаемого участка – 400 км;
- расстояние от СТ КА до центра снимаемого участка: от – 440 км до + 440 км;
- географическая широта центра участка – 45 град.



**Рис. 2. Зависимость программного угла поворота КА по крену от расстояния между центром участка и СТ КА**

Следует учитывать, что за счет вращения Земли в течение времени съемки участка для получения первого изображения стереопары и перенацеливания КА участок сместится в сторону от трассы КА (когда участок

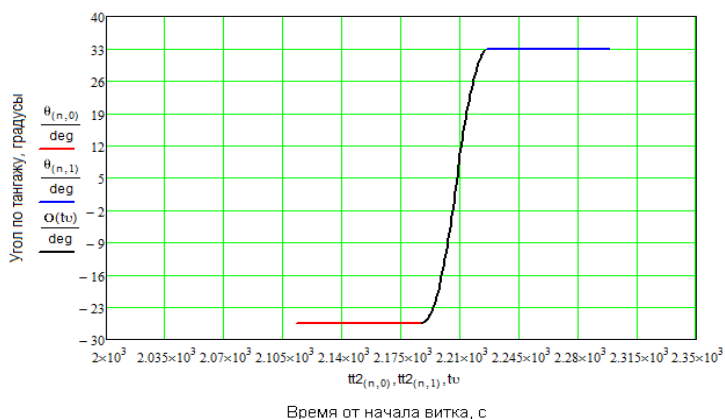
расположен слева от трассы КА) или в сторону трассы КА (когда участок расположен справа от трассы КА). Поэтому программный угол ориентации КА по крену для получения второго изображения стереопары должен быть меньше, чем для первого изображения, когда участок расположен справа от трассы КА, и больше, чем для первого изображения, когда участок расположен слева от трассы КА.

Расчеты, результаты которых приведены на рис. 3–5, выполнены при следующих условиях:

- высота орбиты КА – 650 км;
- наклонение орбиты КА – 98 град.;
- аргумент широты КА в восходящем узле орбиты – 60 град.;
- время перенацеливания КА в канале тангажа на 70 градусов – 45 с;
- длина снимаемого участка – 550 км;
- расстояние от СТ КА до центра снимаемого участка – 200 км;
- географическая широта центра участка – 45 град.

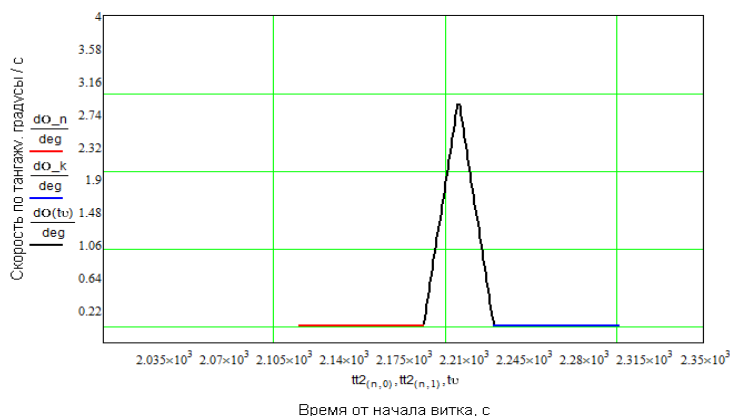
На рис. 3–5 представлены зависимости программных значений угла ориентации КА по тангажу, угловой скорости и угловому ускорению от времени. В каналах крена и рыскания зависимости имеют аналогичный характер, но отличаются численными значениями.

На рис. 3 представлена зависимость программного угла ориентации КА по тангажу от времени.



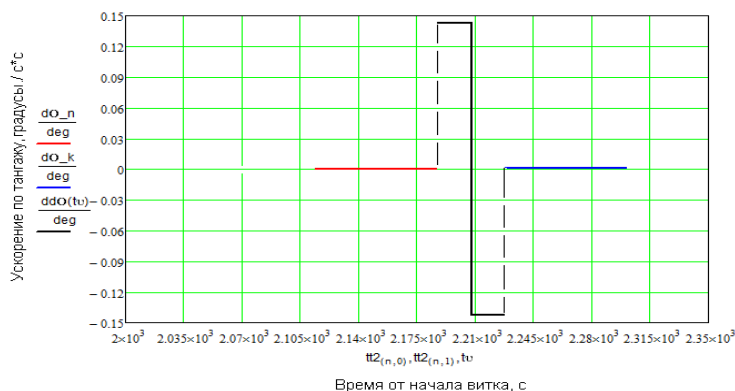
**Рис. 3. Зависимость программного угла ориентации КА по тангажу от времени**

На рис. 4 представлена зависимость скорости изменения программного угла ориентации КА по тангажу от времени.



**Рис. 4. Зависимость скорости изменения программного угла ориентации КА по тангажу от времени**

На рис. 5 представлена зависимость ускорения изменения программного угла ориентации КА по тангажу от времени.



**Рис. 5. Зависимость ускорения изменения программного угла ориентации КА по тангажу от времени**

**Выводы.** Для обеспечения проведения стереосъемки участков Земли в заданных условиях получены аналитические выражения для расчета величин программных углов ориентации, угловых скоростей и ускорений КА в каналах тангажа, крена, рыскания от времени. Предложенная методика расчета параметров угловых маневров КА позволяет также определить предельные значения длины снимаемого участка Земли и расстояния от центра участка до следа трассы КА при стереосъемке. Приведены результаты численных расчетов параметров угловых маневров КА для конкретных условий съемки участков Земли.

### Библиографические ссылки

1. Батраков А. С. Общая модель для расчета и анализа скорости сдвига оптического изображения при съемке земной поверхности / А. С. Батраков // Исследование Земли из космоса. – № 4. – 1989. – С. 99–106.
2. Петрищев В. Ф. Оптимальное сканирование космическим аппаратом поверхности Земли : учеб. пособие / В. Ф. Петрищев. – Самара : Изд-во СГАУ, 2007. – 96 с.

3. **Разыграев А. П.** Основы управления полетом космических аппаратов / А. П. Разыграев. – М. : Машиностроение, 1977. – 472 с.

4. **Раушенбах Б. В.** Управление ориентацией космических аппаратов / Б. В. Раушенбах, Е. Н. Токарь. – М. : Наука, 1974. – 600 с.

*Надійшла до редколегії 05.03.2017*

УДК 621.454

**Ю. А. Митиков, К. А. Татаринев**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **АНАЛИЗ ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ НАДДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ**

Осуществлен анализ конструкций реализованных систем наддува топливных баков двигательных установок ракет-носителей. Выявлены основные тенденции совершенствования систем наддува. Найдены прогрессивные решения, сформулированы проблемы и нерешенные вопросы, препятствующие их дальнейшему применению в ракетно-космической технике. Первая часть исследования посвящена системам наддува баков с жидким кислородом от первой баллистической ракеты ФАУ-2 до ракеты-носителя «Зенит».

**Ключевые слова:** ракеты-носители, баки с жидким кислородом, системы наддува, пути совершенствования.

Здійснено аналіз конструкцій реалізованих систем наддування паливних баків рушійних установок ракет-носіїв. Виявлено основні тенденції вдосконалення систем наддування. Знайдено прогресивні рішення, сформульовано проблеми і невирішені питання, які перешкоджають їх подальшому застосуванню в ракетно-космічній техніці. Перша частина дослідження присвячена системам наддування баків з рідким киснем від першої балістичної ракети Фау-2 до ракети-носія «Зеніт».

**Ключові слова:** ракети-носії, баки з рідким киснем, системи наддування, шляхи вдосконалення.

The analysis of the constructions of the implemented systems of pressurization of fuel tanks of propulsion systems of launch vehicles is carried out. The basic tendencies of perfection of systems of pressurization are revealed. Progressive solutions have been found, problems and unresolved issues have been formulated that prevent their further application in rocket and space technology. The first part of the study is devoted to systems of pressurization of tanks with liquid oxygen from the first ballistic missile Fay-2 to the rocket "Zenit".

**Keywords:** rockets, tanks with liquid oxygen, pressurization systems, ways of improvement.

**Введение.** Системы наддува (СН) топливных баков двигательных установок (ДУ) входят в состав ПГС подачи топлива в ракетные двигатели и являются на сегодняшний день одними из наиболее сложных и наукоемких частей ракет-носителей (РН) [3; 5; 9]. В силу своей специфики (связи со стартовой позицией – потребление рабочих тел наддува) они занимают особое место среди других систем ракетного комплекса (РК). Их значимость определяется не только тем, что масса СН может достигать до 7 % конечной массы ступени [3]. Тип СН во многом формирует как конструкцию ДУ и РН [9] (а, значит, их надёжность и стоимость), так и структуру стартовой позиции [2],