

УДК 621.396.67

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМУЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКЕ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ АНТЕНН КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А. В. Гончарук<sup>1</sup>, М. В. Лукьяненко<sup>2</sup>, В. А. Раевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева»  
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск Красноярского края, ул. Ленина 52  
E-mail: gav78@iss-reshetnev.ru

<sup>2</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: sibgau-sau@mail.ru

*Ставится задача оценить величину возмущающего момента системы наведения антенн (СНА), действующего на космический аппарат (КА), при проведении экспериментальной отработки. Для этого используется стенд инерционный (СИ), способный создавать реальные инерционные нагрузки. Оцениваются величины возмущающих моментов, создаваемых при движении антенны с постоянной скоростью, а также при наборе и снижении скорости при отработке приближения к целеуказанию. Дается оценка полученному значению возмущающего момента, приведенного к посадочному месту блока механического (БМ) СНА. Оценивается величина возможного углового отклонения КА при воздействии на него возмущающего момента, создаваемого при движении антенны. С учетом требований по точности ориентации антенн и КА «Луч-5» полученные результаты считаются приемлемыми и могут использоваться для оценки влияния на точность ориентации аппарата и ориентацию в пространстве антенны при наведении на наземные пункты, международную космическую станцию, КА, находящиеся на низкой и круговой орбитах.*

*Ключевые слова: система наведения антенны, стенд инерционный, возмущающий момент, инерционные нагрузки.*

## EVALUATION OF THE ANTENNA POINTING SYSTEM DISTURBING MOMENT IN THE EXPERIMENTAL PROCESS

A. V. Goncharuk<sup>1</sup>, M. V. Lukyanenko<sup>2</sup>, V. A. Raevsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC "Information satellite system" named after academician M. F. Reshetnev  
52, Lenin str., Jeleznogorsk, 662971, Russian Federation. E-mail: gav78@iss-reshetnev.ru

<sup>2</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation. E-mail: sibgau-sau@mail.ru

*This article provides the task of estimation of the antenna pointing system disturbing moment in the experimental process. For this purpose the installation for the inertia simulation is used. The value of disturbing moments created by the movement of the antenna at a constant rate, as well as the recruitment and reducing the rate at moving closer to the target is estimated. The value of the resulting disturbing moment at the place of the docking unit of the mechanical guidance system antennas is estimated. The value of the possible angular deviation of the spacecraft when exposed the disturbing moment generated by moving the antenna is estimated. According to the requirements on the accuracy of the orientation of the antennas and spacecraft "Luch-5," the results are considered acceptable and can be used to assess the impact on the accuracy of the orientation of the spacecraft and orientation in the space when you point the antenna to the ground station, international space station, space vehicles, which are on the low and circular orbits.*

*Keywords: antenna pointing system, disturbing moments, installation for the inertia simulation.*

При проектировании СНА была поставлена задача оценить величину возмущающего момента системы, действующего на КА, чтобы убедиться, что при выполнении основной функции СНА не влияет на ориентацию и стабилизацию КА [1].

Оценить возможные возмущающие моменты необходимо было в процессе наземной экспериментальной отработки СНА. Для этого был разработан СИ, предназначенный для создания реальных инерционных нагрузок, проверки возмущающих моментов при работе электромеханических устройств типа БМ СНА.

СИ имеет следующий состав:

- подставка под объект контроля, включающая в себя основание и плиту установочную;
- инерционный имитатор, включающий в себя штангу, наборы грузов, элемент передачи момента на выходной вал, переходник и кронштейн для установки датчика угловой скорости;
- система обезвешивания;
- инерционно-жесткостный имитатор штанги КА для БМ СНА;
- датчик угловой скорости (ДУС).

Функциональная схема СИ представлена на рис. 1.

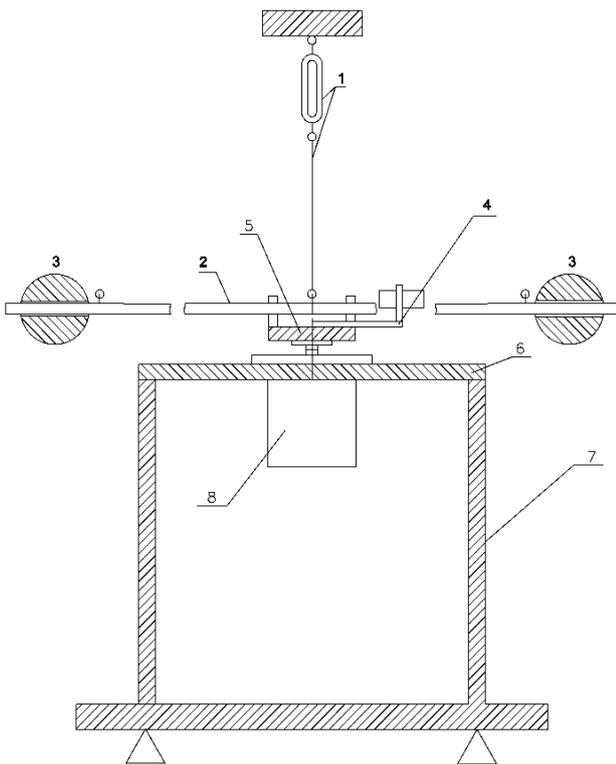


Рис. 1. Функциональная схема инерционного стенда: 1 – система обезвешивания; 2 – штанга; 3 – груз; 4 – датчик угловой скорости с кронштейном для установки; 5 – элемент для передачи момента на выходной вал; 6 – плата установочная; 7 – основание; 8 – объект контроля

Стенд построен для однокоординатного измерения возмущающих моментов при вращении механизма. На СИ с помощью ДУС, установленного на выходном валу БМ СНА:

- измерялась величина угловой скорости выходного вала БМ СНА с частотой опроса 100 Гц;
- определялась величина углового ускорения выходного вала БМ СНА путем дифференцирования угловой скорости;
- определялась величина возмущающего момента по формуле

$$M_B = J_H \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

где  $J_H$  – момент инерции нагрузки,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения выходного вала БМ СНА по показаниям внешнего измерителя угловой скорости,  $\text{рад}/\text{с}$ .

При проведении данной работы инерционным имитатором создавался момент инерции, равный  $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Такая величина момента инерции обусловлена результатами разработки антенного рефлектора. Измерение возмущающего момента при движении БМ СНА проводилась в два этапа. На первом этапе были получены результаты по возмущающим моментам, создаваемым при движении антенны с постоянной скоростью. Имитировался режим движения со скоростью в диапазоне скоростей слежения за подвижными объектами. На втором этапе работы оценивалась величина возмущающего момента при наборе и снижении скорости при отработке приближения к целеуказанию (подходе к точке).

Для построения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) возмущающих моментов использовалась программная среда Matlab, функция `fft` [2, с. 138], реализующая алгоритм быстрого преобразования Фурье.

При испытаниях с моментом инерции, равным  $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , с постоянной скоростью в заданном диапазоне от 0 до  $1,2'/\text{с}$  максимальная амплитуда периодической составляющей возмущающего момента составила:

- в диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц –  $1,023 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- в диапазоне частот более 1 Гц –  $3,025 \cdot 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Результаты измерений возмущающих моментов при работе канала СНА с постоянной скоростью с моментом инерции, равным  $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , приведены в табл. 1.

Графики АЧХ возмущающих моментов приведены на рис. 2, 3.

При испытаниях с моментом инерции, равным  $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , при разгоне до максимальной скорости ( $7'/\text{с}$ ) максимальная амплитуда периодической составляющей возмущающего момента составила:

- в диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц –  $1,445 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- в диапазоне частот более 1 Гц –  $2,482 \cdot 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Результаты измерений возмущающих моментов, создаваемых каналом СНА при разгоне до максимальной скорости ( $7'/\text{с}$ ) с моментом инерции, равным  $34,5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , приведены в табл. 2.

Графики АЧХ возмущающих моментов приведены на рис. 4, 5.

Таблица 1

Привод	Постоянная скорость, %	Возмущающий момент, Н·м		Привод	Постоянная скорость, %	Возмущающий момент, Н·м	
		В диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц	В диапазоне частот более 1 Гц			В диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц	В диапазоне частот более 1 Гц
В	0,1	$0,0455 \cdot 10^{-3}$	$1,242 \cdot 10^{-2}$	Н	0,1	$0,0513 \cdot 10^{-3}$	$1,902 \cdot 10^{-2}$
	0,3	$0,1283 \cdot 10^{-3}$	$1,713 \cdot 10^{-2}$		0,3	$0,1436 \cdot 10^{-3}$	$2,734 \cdot 10^{-2}$
	1	$0,3347 \cdot 10^{-3}$	$0,442 \cdot 10^{-2}$		1	$0,4254 \cdot 10^{-3}$	$2,746 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2

Привод	Приращение скорости при разгоне, %	Возмущающий момент, Н·м		Привод	Приращение скорости при разгоне, %	Возмущающий момент, Н·м	
		В диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц	В диапазоне частот более 1 Гц			В диапазоне частот от 0,1 до 1 Гц	В диапазоне частот более 1 Гц
В	0,1	$0,8998 \cdot 10^{-3}$	$1,682 \cdot 10^{-2}$	Н	0,1	$0,7277 \cdot 10^{-3}$	$1,331 \cdot 10^{-2}$
	0,3	$1,006 \cdot 10^{-3}$	$1,717 \cdot 10^{-2}$		0,3	$0,8711 \cdot 10^{-3}$	$1,206 \cdot 10^{-2}$
	0,5	$1,289 \cdot 10^{-3}$	$1,307 \cdot 10^{-2}$		0,5	$1,213 \cdot 10^{-3}$	$0,454 \cdot 10^{-2}$
	0,1	$0,768 \cdot 10^{-3}$	$0,475 \cdot 10^{-2}$		0,1	$0,6984 \cdot 10^{-3}$	$1,855 \cdot 10^{-2}$
	0,3	$1,121 \cdot 10^{-3}$	$1,323 \cdot 10^{-2}$		0,3	$1,049 \cdot 10^{-3}$	$1,375 \cdot 10^{-2}$
	0,5	$1,445 \cdot 10^{-3}$	$2,482 \cdot 10^{-2}$		0,5	$1,238 \cdot 10^{-3}$	$1,201 \cdot 10^{-2}$

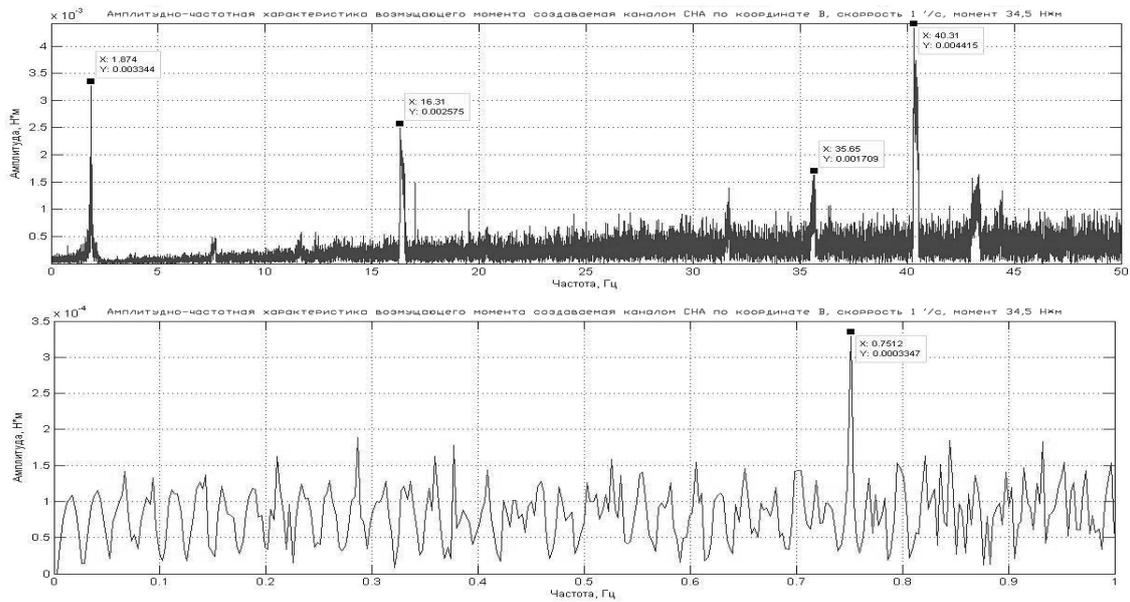


Рис. 2. График АЧХ привода В при работе с постоянной скоростью 1 %/с

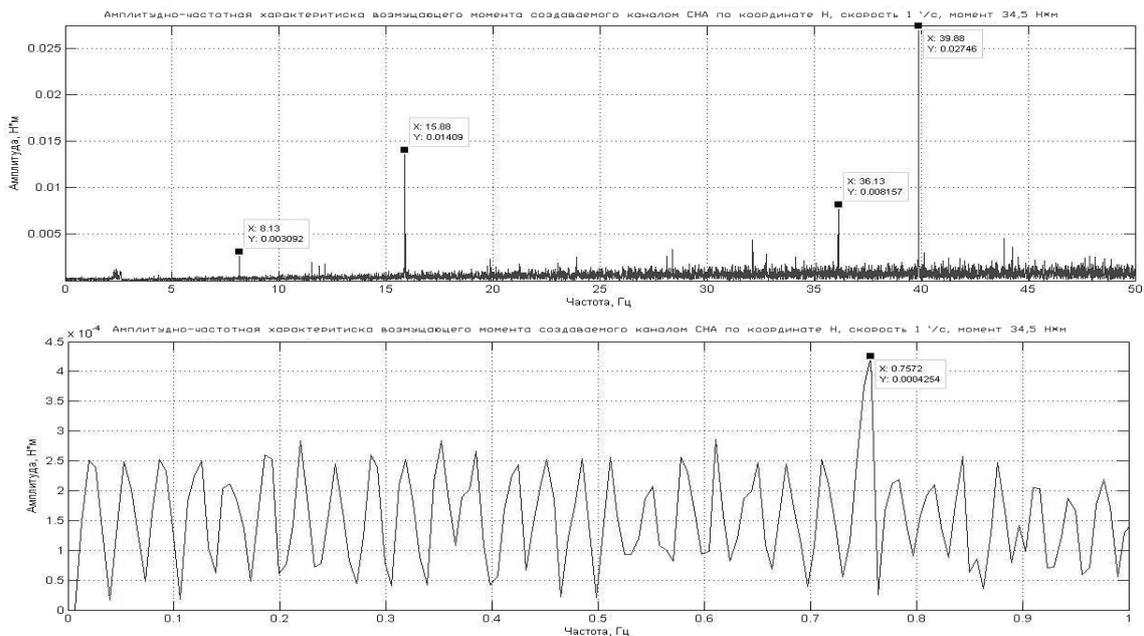


Рис. 3. График АЧХ привода Н при работе с постоянной скоростью 1 %/с

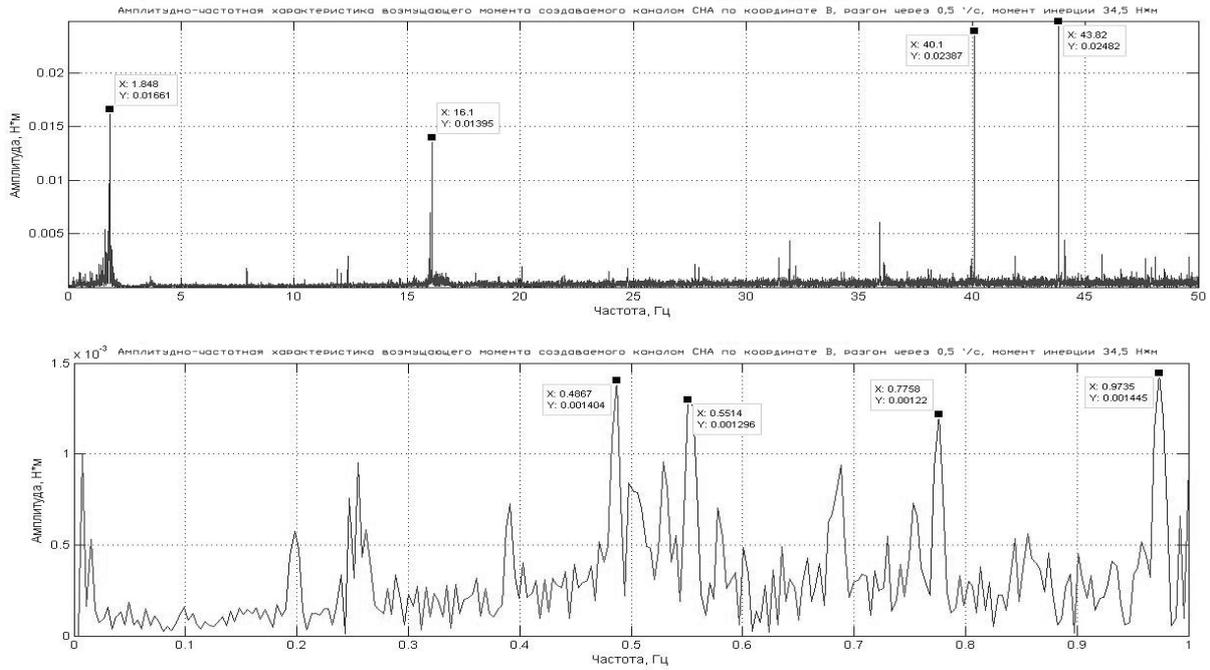


Рис. 4. График АЧХ БМ СНА привод В2 (разгон через 0,5 %/с)

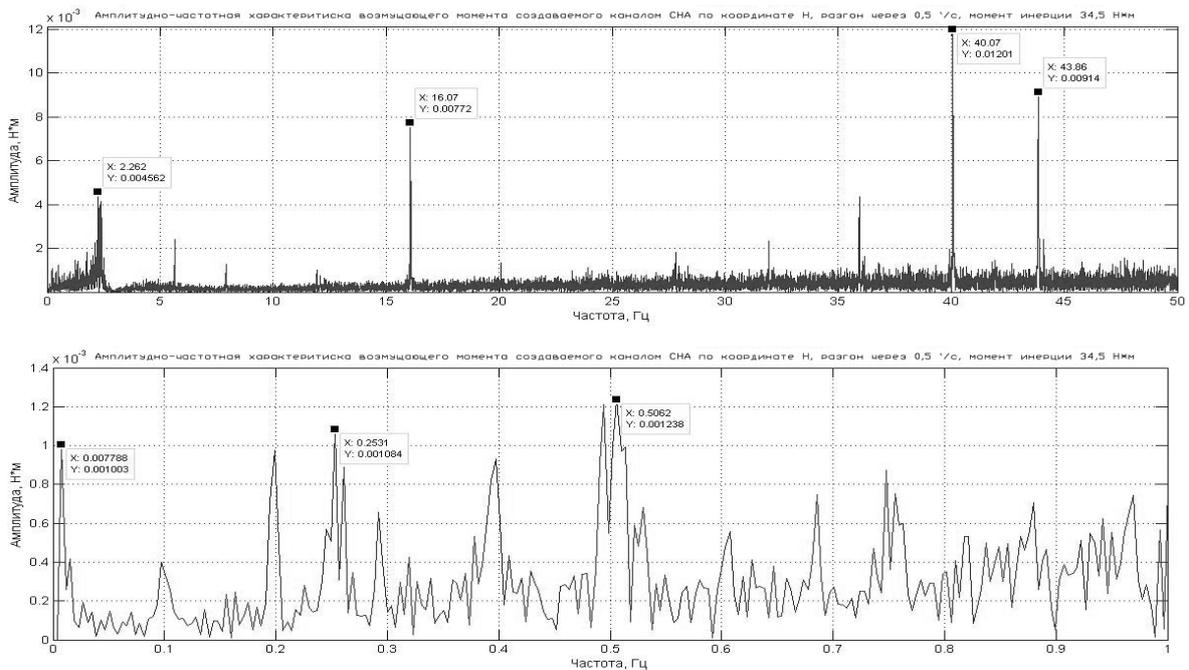


Рис. 5. График АЧХ БМ СНА, привод Н2 (разгон через 0,5 %/с)

Максимальная амплитуда периодической составляющей для собственных колебаний ДУС приходится на частоты 15,87 и 39,87 Гц.

Максимальная амплитуда периодической составляющей для собственных колебаний штанги СИ приходится на частоты 2,685 Гц.

Результаты измерений показали:

– СНА при работе с моментом инерции нагрузки 34,5 кг·м<sup>2</sup>, рассчитанным для модуля полезной нагрузки КА «Луч-5А», при движении приводов со скоростями от 0 до 1,2%/с в диапазоне частот от 0,1

до 1 Гц не создает возмущающих моментов, превышающих установленные требования;

– СНА при работе с моментом инерции нагрузки 34,5 кг·м<sup>2</sup>, рассчитанным для модуля полезной нагрузки КА «Луч-5А», при движении с выходом на максимальную скорость и торможением до нулевой скорости создает возмущающие моменты, превышающие установленные требования на 44 % для периодической составляющей в диапазоне от 0,1 до 1 Гц и на 48 % для периодической составляющей во всем диапазоне частот от 1 Гц.

Наличие в частотном спектре в диапазоне частот от 1 Гц периодической составляющей возмущающего момента с амплитудой, превышающей заданные пределы, обусловлено наличием в данной области частот периодических составляющих собственных колебаний штанги инерционного макета и ДУС.

Учитывая, что режим работы СНА с небольшим превышением уровней возмущающих моментов кратковременный (при движении из нулевого положения в крайнюю точку зоны перенацеливания не более 2,5 минут), а в режимах движения с постоянной скоростью уровни возмущающих моментов не превышают заданных требований, то полученные результаты можно считать приемлемыми для КА серии «Луч-5».

Полученные результаты характеризуют величину возмущающих моментов, приведенных к посадочному месту БМ СНА.

Момент, приложенный к штанге, на которой размещен БМ с антенной, определяется по формуле (1). Тогда относительно величины этого момента, приложенного к концу штанги, можно оценить величину углового отклонения КА. Величину углового смещения определим через ускорение, придаваемое КА возмущающим моментом:

$$\ddot{\theta}_{КА} = \frac{M_B}{J_{КА}}, \quad (2)$$

где  $J_{КА}$  – момент инерции КА, кг·м<sup>2</sup>;  $\ddot{\theta}_{КА}$  – угловое ускорение КА, /с<sup>2</sup>.

Не учитывая динамику движения космического аппарата и допуская, что он является твердым телом с моментом инерции, угловое смещение от действия возмущающего момента в одной плоскости можно определить как

$$\theta_{КА} = \frac{\ddot{\theta}_{КА} \cdot T_{уп}^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\theta_{КА}$  – угловое смещение КА, °;  $T_{уп}$  – время работы программного обеспечения, с.

С учетом выражения (2) выражение (3) примет вид:

$$\theta_{КА} = \frac{M_B \cdot T_{уп}^2}{2 \cdot J_{КА}}, \quad (4)$$

Подставляя в выражение (4) следующие значения: возмущающий момент  $2,482 \cdot 10^{-2}$  Нм, момент инерции

КА 4800 кг·м<sup>2</sup>, время работы программного обеспечения 4 с, получаем величину  $\theta_{КА} = 0,153'$ .

Полученная величина отклонения КА при действии возмущающего момента не превышает допустимого значения для отклонения ориентации при движении антенн КА серии «Луч».

В результате проведенной работы были получены данные о величине возмущающих моментов, которые могут создаваться при работе системы наведения антенн, как в режиме слежения, так и в режиме перевода в точку. С учетом требований по точности ориентации антенн и КА «Луч-5» в целом, полученные результаты можно считать приемлемыми. Данные результаты могут быть использованы для оценки динамических процессов на КА в целом и оценки влияния на его точность ориентации и ориентацию в пространстве антенны при наведении на наземные пункты, международную космическую станцию, КА, находящиеся на низкой и круговой орбитах. В случае применения систем наведения антенн при лазерном наведении, что влечет за собой более точную ориентацию антенн и КА в единицы угловых секунд, данная работа будет требовать дополнительного изучения характера возникновения возмущающих моментов для уменьшения их величины и возможности их компенсации.

#### Библиографические ссылки

1. Раевский В. А., Гончарук А. В. ФЕИТ. 371111.039. 2005.
2. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб. : Питер, 2002. 608 с.

#### References

1. Raevsky V. A., Goncharuk A.V. FEIT. 371111.039, 2005.
2. Dyakonov V. P., Abramenkova I. V. *MATLAB. Obrabotka signalov i izobrazheniy* (MATLAB. Signal and image processing). A special handbook. St. Petersburg, Peter, 2002, 608 p.

© Гончарук А. В., Лукьяненко М. В., Раевский В. А., 2013