



ISSN 1606-146X

№ 2 (52)

2014

Қазақстан Республикасы
Ұлттық инженерлік академиясының
Х А Б А Р Ш Ы С Ы

В Е С Т Н И К

Национальной инженерной академии
Республики Казахстан





Қазақстан Республикасы
Ұлттық инженерлік академиясының
ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК
Национальной инженерной академии
Республики Казахстан

№ 2 (52)

Алматы
2014

СОДЕРЖАНИЕ

КЛЮЧЕВЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

VII Астанинский экономический форум и II Всемирная антикризисная конференция	5
---	---

<i>Назарбаев Н. А.</i> Выступление Президента Республики Казахстан на открытии пленарного заседания VII Астанинского экономического форума.....	8
---	---

<i>Жумагулов Б. Т.</i> Наука, инновации, кадры – ключевые ресурсы устойчивой энергетики	14
---	----

Всемирный конгресс инженеров и ученых «Энергия будущего: инновационный сценарий и перспективы его реализации»	17
--	----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

<i>Zhumagulov B.T., Issakhov A.</i> Mathematical and computer modelling of thermal process to aquatic environment.....	18
--	----

<i>Akhmed-Zaki D.Zh., Kumalakov B.A.</i> Solving complex iterative tasks using intellectual load distribution and MPI.....	25
--	----

<i>Молдабеков М.М., Ахмедов Д.Ш., Алимбаев К.А., Елубаев С.А., Бонеев Т.М., Сухенко А.С.</i> Математическая модель системы управления вращением космического аппарата вокруг заданной оси	32
---	----

<i>Самигулина Г.А., Самигулина З.И.</i> Интеллектуальная технология прогнозирования барбитуратов на основе иммунно-сетевого моделирования.....	39
--	----

НОВОСТИ НАУКИ И ТЕХНИКИ	44
--------------------------------------	----

МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Есхожин Д.З., Нукешев С.О., Ахметов Е.С., Жаксылыкова З.С., Балабекова А.Т.</i> Теоретическое обоснование параметров эффективного аппарата для высева некондиционных минеральных удобрений	48
---	----

<i>Олейник А.И., Рахимов З.Р.</i> Определение устойчивых параметров нагруженных глинистых откосов	57
---	----

<i>Шардарбек М.Ш., Маханбеталиева К.Т.</i> Доға таспалы транспортермен материалдарды тасымалдау кезіндегі энергия күшінің шығынын зерттеу	67
---	----

ЭНЕРГЕТИКА

- Болотов А.В.* Энергосбережение: стратегия, тактика и технологии..... 73
- Надиров Н.К., Некрасов В.Г., Кенжебекова К.Н.* Возобновляемые источники энергии в решении продовольственной проблемы 80

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Монтаев С.А., Таскалиев А.Т., Монтаева Н.С.* Технология производства искусственного щебня из кремнистой породы опоки..... 86
- ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ** 92

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Егоров О. И., Кальменова М. Т.* Морские месторождения Казахстана: проблемы освоения..... 96
- Медиева Г.А., Чигаркина О.А.* Экономическая эффективность синтетического жидкого топлива как альтернативы углеводородным ресурсам..... 103
- Тагайбекова Н.П.* Исследование инновационных стратегий казахстанских компаний..... 113
- Шалболова Ү.Ж., Елпанова М.А., Қазбекова Л.А.* Аймақтың мунай-газ өндіру кезеңіндегі экологиялық қауіпсіздігін жетілдіруді қамтамасыз ету жолдары 119

ЭКОЛОГИЯ

- Ошакбаев М.Т., Тонкопий М.С., Тилекова Ж.Т.* Экологический анализ природно-технических геосистем Прибалкашья 130

ЮБИЛЕЙНЫЕ ДАТЫ

- Болотов Альберт Васильевич** (К 80-летию со дня рождения) 135
- Бейсенов Ораз Макаевич** (К 80-летию со дня рождения)..... 137
- Амиров Кулман Молдазимович** (К 75-летию со дня рождения)..... 138
- Бижанов Нурахмет Кусаинович** (К 70-летию со дня рождения)... 139
- Джакупов Кабибулла Кабенович** (К 65-летию со дня рождения)..... 140
- Абугалиев Суйншбек Курманбаевич** (К 60-летию со дня рождения)... 141

ХРОНИКА, СОБЫТИЯ, ФАКТЫ 142

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ..... 155

CONTENTS

THE KEY PROBLEMS OF THE DEVELOPMENT OF SCIENCE AND ENGINEERING ACTIVITY

The VII Astana economic forum and II World anti-crisis conference	5
<i>Nazarbayev N. A.</i> The speech of the President of the Republic of Kazakhstan at opening of Plenary Session of the VII Astana economic forum.....	8
<i>Zhumagulov B.T.</i> Science, innovations, personnel – key resources of stable power engineering	14
World Congress of engineers and scientists “Energy of the future: innovation scenario and prospects of its realization”	17

INFORMATION TECHNOLOGIES AND APPLIED MATHEMATICS

<i>Zhumagulov B.T., Issakhov A.</i> Mathematical and computer simulation of thermal process in aqueous medium.....	18
<i>Akhmed-Zaki D.Zh., Kumalakov B.A.</i> Solving complex iterative problems using intellectual distribution of computer load and MPI	25
<i>Moldabekov M.M., Akhmedov D. Sh., Alipbayev K.A., Yelubayev S.A., Bopeyev T.M., Sukhenko A.S.</i> Mathematical model of system for control of spacecraft rotation around given axis	32
<i>Samigulina G.A., Samigulina Z.I.</i> Intellectual technology of barbiturates forecasting based on immune net simulation	39

NEWS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY	44
---	-----------

MECHANICS AND MACHINE BUILDING

<i>Yeskhozhin D.Z., Nukeshev S.O., Akhmetov Ye.S., Zhaksylykova Z.S., Babalbekova A.T.</i> Theoretical substantiation parameters of machine for sowing of non-standard mineral fertilizers	48
<i>Oleinik A.I., Rakhimov Z.R.</i> Determination of stable parameters of loaded clay slopes	57
<i>Shardarbek M.Sh., Makhanbetaliyeva K.T.</i> Studying of energy-power consumption when materials transporting by arc belt conveyor	67

POWER ENGINEERING

<i>Bolotov A.V.</i> Energy saving: strategy, tactics and technologies.....	73
--	----

<i>Nadirov N.K., Nekrasov V.G., Kenzhebekova K.N.</i> Renewable energy sources in solving food problem	80
--	----

CONSTRUCTION MATERIALS

<i>Montayev S.A., Taskaliyev A.T., Montayeva N.S.</i> Technology of man-made crushed stone production with opoka siliceous rock of Western Kazakhstan using	86
---	----

DO YOU KNOW	92
--------------------------	----

ECONOMY AND MANAGEMENT

<i>Yegorov O.I., Kalmenova M.T.</i> Sea deposits in Kazakhstan: problems of development.....	96
--	----

<i>Mediyeva G.A., Chigarkina O.A.</i> Economic efficiency of synthetic liquid fuel as alternative to hydrocarbon recourses	103
--	-----

<i>Tagaibekova N.P.</i> Studying of innovation strategies of Kazakhstan's companies	113
---	-----

<i>Shalbolova U.Zh., Elpanova M.A., Kazbekova L.A.</i> Ways to ensure environmental security in the region when oil and gas producing	119
---	-----

ECOLOGY

<i>Oshakbayev M.T., Tonkopiyy M.S., Tilekova Zh. T.</i> Ecological analysis of natural-technical geosystems of the Balkhash region	130
--	-----

JUBILEE DATE

Bolotov Albert Vasilyevich (To 80-th birthday)	135
Beisenov Oraz Makayevich (To 80-th birthday).....	137
Amirov Kulman Moldazimovich (To 75-th birthday).....	138
Bizhanov Nurakhmet Kusainovich (To 70-th birthday).....	139
Dzhakupov Kabibulla Kabenovich (To 65-th birthday).....	140
Abugaliyev Suinshbek Kurmanbayevich (To 60-th birthday).....	141

THE CHRONICLE, EVENTS, FACTS	142
---	-----

THE INFORMATION ABOUT AUTHORS	155
--	-----

**М. М. МОЛДАБЕКОВ¹, Д. Ш. АХМЕДОВ², К. А. АЛИПБАЕВ²,
С. А. ЕЛУБАЕВ², Т. М. БОПЕЕВ², А. С. СУХЕНКО²**

¹Национальное космическое агентство Республики Казахстан
²ДТОО «Институт космической техники и технологий» АО «Национальный центр
космических исследований и технологий»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ВОКРУГ ЗАДАННОЙ ОСИ

Излагается инженерный подход к построению математической модели системы управления вращением космического аппарата (КА) с инерционным исполнительным органом в виде маховика. Рассматривается частный случай управления вращением КА вокруг заданной оси. При построении математической модели учитываются особенности режимов работы инерционного исполнительного органа и потери на трение в опорах осей электродвигателя, редуктора и маховика. Детально описан подход к разработке закона управления с обратной связью для инерционного исполнительного органа. Также приведена структурная схема системы управления угловым положением КА с помощью инерционного исполнительного органа – маховика.

Ключевые слова: космический аппарат, система управления, ориентация, закон управления, инерционный исполнительный орган, маховик.

Мақалада сермер түріндегі инерциялық атқарушы органы бар ғарыш аппараттың айналуын басқару жүйесінің математикалық үлгісін қалыптастыруға бағытталған инженерлік тәсілдеме баяндалады. Ғарыш аппаратының берілген білік бойымен айналуын басқарудағы жеке жағдайлар қарастырылған. Математикалық үлгіні қалыптастыру барысында инерциялық атқарушы органның жұмыс істеу режимінің ерекшеліктері мен сермер, бәсеңдеткіш және электқозғалтқыш біліктерінің тіректеріндегі үйкеліс шығындары ескеріледі. Мақалада инерциялық атқарушы органға арналған кері байланысты басқару заңын әзірлеудің тәсілдемесі толық сипатталған. Сондай-ақ, инерциялық атқарушы орган – сермер арқылы ғарыш аппараттың бұрыштық қалпын басқару жүйесінің құрылымдық сұлбасы келтірілген.

Кілттік сөздер: ғарыштық аппараты, басқару жүйесі, бағыт, басқару заңы, инерциялық атқарушы орган, сермер.

In the paper engineering approach is presented to construction of mathematical model of system for control of spacecraft (SC) rotation with inertial actuator in a form of reaction wheel. A special case is studied of control of SC rotation around given axis. When mathematical model constructing behaviors of operation modes of inertial actuator and the friction losses in supports of axes of electric motor, reduction gear and reaction wheel were taken into account. In the paper approach is described in details to development of law of feedback control for the inertial actuator. Structural scheme is also given of SC attitude control using the inertial actuator – the reaction wheel.

Keywords: spacecraft, control system, orientation, control law, inertial actuator, reaction wheel.

Управление вращением космического аппарата (КА) является одной из основных задач системы управления движением и навигации космического аппарата, решаемой для обеспечения оптимальной работы полезной нагрузки, проведения космической съемки и сеансов связи с КА. Рассмотрим частный случай управления вращением КА вокруг заданной оси с помощью инерционного исполнительного органа – маховика.

Управляющий момент, который создает маховик, может быть вычислен по формуле

$$M_m = J_m \dot{\omega}_m, \tag{1}$$

где M_m – управляющий момент; J_m – момент инерции; $\dot{\omega}_m$ – угловое ускорение маховика.

Кинетический момент K_m маховика имеет вид [1,2]

$$K_m = J_m \omega_m, \tag{2}$$

где K_m – кинетический момент; ω_m – угловая скорость маховика.

Угловую скорость КА можно определить, зная его момент инерции, момент инерции маховика и его угловую скорость вращения на основе закона сохранения момента количества движения, при условии, что внешние моменты малы в сравнении с управляющим моментом маховика [3,4]:

$$J_k \omega_k + J_m \omega_m = C = \text{const}, \tag{3}$$

где J_k – момент инерции КА; ω_k – угловая скорость КА.

$C = 0$ в уравнении (3) соответствует частному случаю, когда в начальный момент времени t_0 маховик и КА находятся в состоянии покоя, т.е.

$$\omega_m(t_0) = \omega_k(t_0) = 0. \tag{4}$$

Соответственно при раскручивании маховика из его состояния покоя будет иметь место следующая зависимость между угловыми скоростями маховика и КА:

$$\omega_k = -\frac{J_m}{J_k} \omega_m. \tag{5}$$

В общем случае в уравнении (3) $C \neq 0$. Для определения ограничимся рассмотрением опорного установившегося режима, когда к моменту времени t_0 маховик уже раскручен, но КА не вращается и занимает определенное угловое положение, т.е.

$$\omega_m(t_0) = \omega_m^0 = \text{const}, \omega_k(t_0) = 0, \varphi_k(t_0) = \varphi_k^0 = \text{const}, \tag{6}$$

где ω_m^0 – угловая скорость маховика в опорном режиме; φ_k^0 – начальное положение КА.

Тогда из выражения (3) получим, что для опорного режима

$$C = J_m \omega_m^0. \tag{7}$$

Для переходного режима, когда КА переводится из начального положения φ_k^0 в заданное конечное положение φ_k^1 , равенство (3) с учетом (6), (7) примет вид

$$J_k \omega_k + J_m \omega_m = J_m \omega_m^0. \tag{8}$$

Отсюда для угловой скорости КА имеем

$$\omega_k = -\frac{J_m}{J_k} (\omega_m - \omega_m^0). \tag{9}$$

Для обеспечения раскручивания маховика используется электродвигатель постоянного тока, уравнения движения которого имеют вид [5]:

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} = -IR - c\Phi\omega + U, \\ J_{\partial} \frac{d\omega}{dt} = c\Phi I, \end{cases} \quad (10)$$

где L – индуктивность; I – ток; R – активное сопротивление; U – напряжение питания цепи; ω – угловая скорость; J_{∂} – момент инерции якоря электродвигателя; c – электромагнитная постоянная; Φ – магнитный поток статора электродвигателя.

Маховик связан с электродвигателем через понижающий редуктор передаточным отношением K_p ($K_p = \text{const}$), т.е.

$$\omega_M = K_p \omega. \quad (11)$$

Тогда уравнения движения электродвигателя и маховика с учетом приведения момента инерции якоря электродвигателя к валу маховика будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} = -IR - \frac{c\Phi}{K_p} \omega_M + U, \\ J_M^n \frac{d\omega_M}{dt} = \frac{c\Phi}{K_p} I, \end{cases} \quad (12)$$

где $J_M^n = J_M + \frac{1}{K_p^2} J_{\partial}$ – приведенный к валу электродвигателя суммарный момент инерции якоря электродвигателя и маховика.

Перейдем от системы дифференциальных уравнений (12) относительно угловой скорости маховика ω_M и тока якоря I к одному дифференциальному уравнению относительно ω_M . Для этого выразим из второго уравнения (12) ток якоря I и подставим в первое:

$$\ddot{\omega}_M + \frac{R}{L} \dot{\omega}_M + \frac{J_M^n}{b^2} \omega_M = \frac{1}{Lb} U, \quad (13)$$

где $b = \frac{J_M^n K_p}{c\Phi}$, $\ddot{\omega}_M = \frac{d^2 \omega_M}{dt^2}$, $\dot{\omega}_M = \frac{d\omega_M}{dt}$.

В уравнении (13) перейдем от переменной ω_M к переменной ω_k . Для этого запишем выражение (9) в виде:

$$\omega_M = \omega_M^0 - \frac{1}{K_0} \omega_k, \quad (14)$$

где $K_0 = \frac{J_M^n}{J_k}$.

Подставляя (14) в (13), получаем дифференциальное уравнение движения КА относительно его угловой скорости:

$$\ddot{\omega}_k + \frac{R}{L} \dot{\omega}_k + \frac{J_M^n}{Lb^2} \omega_k = -\frac{K_0}{Lb} \Delta U, \quad (15)$$

(10) $\Delta U = U - U^0$ – управляющее напряжение питания; $U^0 = \frac{c\Phi}{K_p} \omega_M^0$ – напряжение питания электродвигателя в опорном режиме.

Соответственно для углового положения КА φ_k уравнение (15) примет вид

$$\ddot{\varphi}_k + \frac{R}{L} \dot{\varphi}_k + \frac{J_M^n}{Lb^2} \varphi_k = -\frac{K_0}{Lb} \Delta U. \quad (16)$$

Управление угловым положением КА φ_k будем проводить на основе минимизации отклонения $\Delta\varphi_k$ от требуемого углового положения φ_k^1 [6,7]:

$$\Delta\varphi_k = \varphi_k - \varphi_k^1. \quad (17)$$

Для обеспечения устойчивости требуемых углового положения КА и качества переходного процесса (время переходного процесса t_n и колебательность) от начального положения к требуемому закон управления с обратной связью будет в общем виде

$$\Delta U = K_{y0} \Delta\varphi_k + K_{y1} \Delta\dot{\varphi}_k + K_{y2} \Delta\ddot{\varphi}_k, \quad (18)$$

где K_{y0}, K_{y1}, K_{y2} – коэффициенты усиления обратных связей.

Соответствующая схема системы управления угловым положением КА с обратной связью имеет вид, приведенный на рисунке 1.

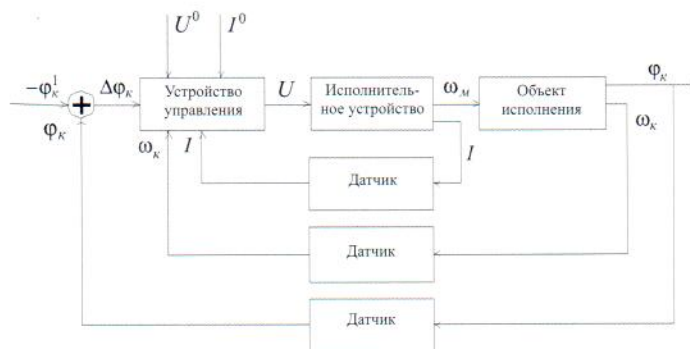


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления угловым положением КА

С учетом того, что $\varphi_k^1 = \text{const}$, из (17) имеем

$$\dot{\varphi}_k = \Delta\dot{\varphi}_k, \ddot{\varphi}_k = \Delta\ddot{\varphi}_k, \ddot{\varphi}_k = \Delta\ddot{\varphi}_k. \quad (19)$$

Подставляя (18) в уравнения движения космического аппарата (16) и учитывая (19), получаем дифференциальное уравнение движения системы управления угловым положением КА относительно отклонения $\Delta\varphi_k$:

$$\Delta\ddot{\varphi}_k + a_2 \Delta\dot{\varphi}_k + a_1 \Delta\varphi_k + a_0 \Delta\varphi_k = 0, \quad (20)$$

$$a_2 = \frac{R}{L} + \frac{K_0 K_{y2}}{Lb}; \quad a_1 = \frac{J_M^n}{Lb^2} + \frac{K_0 K_{y1}}{Lb}; \quad a_0 = \frac{K_0 K_{y0}}{Lb}.$$

Дифференциальное уравнение (20), очевидно, имеет тривиальное решение $\Delta\varphi_k \equiv 0$. Задача определения параметров закона управления (21) заключается в том, чтобы найти такие значения коэффициентов K_{y0}, K_{y1}, K_{y2} , при которых тривиальное решение уравнения (20) асимптотически устойчиво по Ляпунову и время переходного процесса t_n не превышает заданного $t_n \leq t_{пз}$.

Как известно [6], свойства тривиального решения уравнения (20) определяются корнями его характеристического уравнения:

$$\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 = 0, \quad (21)$$

где λ – комплексная переменная.

Для асимптотической устойчивости тривиального решения $\Delta\varphi_k \equiv 0$ по Ляпунову необходимо и достаточно, чтобы корни уравнения (21) имели отрицательные вещественные части, т.е.

$$\operatorname{Re} \lambda_i < 0, \quad i = 1...3. \quad (22)$$

Для обеспечения заданного времени переходного процесса $t_{пз}$ необходимо дополнительно выполнение условий:

$$\operatorname{Re} \lambda_i \leq -\alpha_3 < 0, \quad i = 1...3, \quad (23)$$

где $\alpha_3 > 0$ зависит от заданного $t_{пз}$.

Рассмотрим, каким образом можно вычислить $\Delta\dot{\varphi}_k, \Delta\ddot{\varphi}_k$. Для определения $\Delta\dot{\varphi}_k$ можно использовать измеренное значение угловой скорости КА ω_k , так как из равенства (17) следует

$$\Delta\dot{\varphi}_k = \dot{\varphi}_k = \omega_k, \quad \Delta\ddot{\varphi}_k = \dot{\omega}_k. \quad (24)$$

Выразим $\dot{\omega}_k$ через $\dot{\omega}_m$ с учетом (9):

$$\dot{\omega}_k = -\frac{J_m^n}{J_k} \dot{\omega}_m. \quad (25)$$

Из второго уравнения (12) имеем

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{J_m^n} \frac{c\Phi}{K_p} I. \quad (26)$$

Таким образом, для вычисления $\dot{\omega}_k$ можно использовать измеренное значение тока якоря. Из выражений (24), (25), (26) имеем

$$\Delta\ddot{\varphi}_k = \dot{\omega}_k = -\frac{c\Phi}{K_p J_k} I = -K_i I. \quad (27)$$

Следует учесть, что опорному установившемуся режиму соответствуют опорные значения тока I^0 , угловой скорости ω^0 и напряжения U^0 якоря электродвигателя. Они связаны между собой уравнениями для опорного установившегося режима вращения якоря электродвигателя.

Эти уравнения могут быть получены из уравнений (10) с учетом того, что в опорном установившемся режиме

$$I = I^0 = \text{const}, \omega = \omega^0 = \text{const}, U = U^0 = \text{const}. \quad (28)$$

Подставляя (28) в (10), имеем:

$$\begin{cases} -I^0 R - c\Phi\omega^0 + U^0 = 0, \\ c\Phi I^0 = M_T, \end{cases} \quad (29)$$

где M_T – момент трения вращающихся частей якоря электродвигателя, редуктора и маховика в опорном режиме, приведенный к валу якоря. Из (29) получим

$$I^0 = \frac{M_T}{c\Phi}, \omega^0 = \frac{1}{c\Phi}(U^0 - RI^0). \quad (30)$$

С учетом (28) система уравнений (10) примет вид

$$\begin{cases} L \frac{d\Delta I}{dt} = -R\Delta I - c\Phi\Delta\omega + \Delta U, \\ J_{\dot{\omega}} \frac{d\Delta\omega}{dt} = c\Phi\Delta I, \end{cases} \quad (31)$$

где $\Delta I = I - I^0$; $\Delta\omega = \omega - \omega^0$; $\Delta U = U - U^0$; $J_{\dot{\omega}}$ – приведенный к валу якоря электродвигателя момент инерции маховика.

Соответственно равенство (27) будет иметь вид

$$\Delta\ddot{\varphi}_k = -K_1\Delta I. \quad (32)$$

В результате на основе схемы (см. рисунок 1) и формул (17), (24), (27) разработана детальная схема устройства управления (рисунок 2).

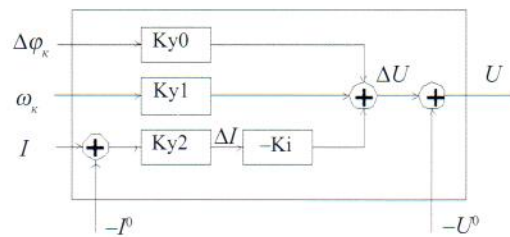


Рисунок 2 – Детальная структурная схема устройства управления

Таким образом, рассмотренный подход к разработке закона управления с обратной связью для инерционного исполнительного органа – маховика позволяет решить задачу управления вращением КА вокруг заданной оси с учетом особенностей режима работы маховика и потерь на трение в опорах осей электродвигателя, редуктора и маховика.

ЛИТЕРАТУРА

1 Маркеев А.П. Теоретическая механика: учебник для университетов. – М.: ЧеРо, 1999. – 572 с.

- 2 Лачуга Ю.Ф., Ксендзов В.А. Теоретическая механика. – М.: Колос, 2005. – 576 с.
- 3 Аппель П. Теоретическая механика. – М.: Физматгиз, 1960. – 515 с.
- 4 Овчинников И. Е., Лагун А. В. Динамика системы ориентации космического летательного аппарата с двигателями-маховиками // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2009. – № 5(63). – С. 48 – 55.
- 5 Джолдасбеков У.А., Молдабеков М.М., Тулешов А.К. Стабилизация натяжения проволоки в многократных прямоточных волочильных станах. – Алматы, 1998. – 127 с.
- 6 Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. – М.: Физматгиз, 1971. – 396 с.
- 7 Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. – М.: Физматгиз, 1966. – 532 с.