

УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМ РОБОТОМ ПРИ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНСПЕКЦИИ СОСТОЯНИЯ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО СПУТНИКА

© 2020 Е.И. Сомов^{1,2}, С.А. Бутырин^{1,2}, Т.Е. Сомова²

¹ Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Самара, Россия

² Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.10.2020

Рассматриваются методы наведения и управления движением космического робота при облёте геостационарного спутника в процессе визуальной инспекции его технического состояния. Приводятся численные результаты, демонстрирующие эффективность разработанных дискретных алгоритмов наведения и управления.

Ключевые слова: космический робот, геостационарный спутник, визуальная инспекция состояния, управление

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-79-83

Работа поддержана РФФИ, грант 20-08-00779.

ВВЕДЕНИЕ

Информационные спутники на геостационарной орбите (ГСО) имеют потребную длительность службы до 25 лет при наличии технического обслуживания с помощью космических роботов-манипуляторов (КРМ). Статья [1] в этом же выпуске журнала содержит описание системы управления движением (СУД) КРМ для его сближения с целью (геостационарным спутником) от расстояния 5000 м до дальности 50 м, синтезированные алгоритмы наведения и управления, а также результаты анализа динамики СУД при таком сближении. Данная статья продолжает исследования [1] и посвящена проблемам наведения и управления движением КРМ при визуальной инспекции технического состояния цели.

МОДЕЛИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данном режиме в СУД КРМ применяются двигательная установка малой тяги (ДУМТ) на основе восьми термokatалитических реактив-

Сомов Евгений Иванович, ведущий научный сотрудник отдела «Динамики и управления движением» СамНЦ РАН; начальник отдела «Навигации, наведения и управления движением» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ. E-mail e_somov@mail.ru

Бутырин Сергей Анфимович, старший научный сотрудник отдела «Динамики и управления движением» СамНЦ РАН; начальник лаборатории «Моделирования систем управления» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ. E-mail butyrinsa@mail.ru

Сомова Татьяна Евгеньевна, научный сотрудник отдела «Навигации, наведения и управления движением» НИИ Проблем надежности механических систем СамГТУ. E-mail te_somova@mail.ru

ных двигателей (РД) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) тяги $P^m = 0.5$ Н каждого РД, силовой гироскопический кластер (СГК) на основе четырёх гиродинов (ГД) с собственным кинетическим моментом (КМ) $h_g = 30$ Нмс и при дальности менее 500 м координаты пространственного движения КРМ относительно цели определяются БИНС, корректируемой сигналами спутников ГЛОНАСС/GPS, и бортовыми оптико-электронными приборами. Для описания движения КРМ применяются геоцентрическая $I_{\oplus} (O_{\oplus} X^i Y^i Z^i)$ и солнечно-эклиптическая I_s инерциальные системы координат (ИСК), обозначения $\{\cdot\} = \text{col}(\cdot)$, $[\cdot] = \text{line}(\cdot)$, $(\cdot)^t$, $[\cdot \times]$ и \circ, \sim для векторов, матриц и кватернионов, а также матрицы $[\alpha]_i$ элементарного поворота вокруг i -ой оси на угол α , $i = 1, 2, 3 \equiv 1 \div 3$. Используются орбитальные системы координат (ОСК) $O_r x^o y^o z^o$ КРМ с полюсом O_r и цели $O_t x_t^o y_t^o z_t^o$ с полюсом O_t , а также связанная с корпусом КРМ система координат (ССК) $O_r x y z$. Предполагается, что на борту КРМ имеется телескоп, ось визирования которого параллельна оси $O_r y$ ССК робота, рис. 1а.

Если считать КРМ твёрдым телом с массой m и тензором инерции \mathbf{J} , то упрощённая модель его пространственного движения относительно ИСК в проекции на оси ССК имеет вид

$$\mathbf{r}^* + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} = \mathbf{v}; \quad m(\dot{\mathbf{v}}^* + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}) = \mathbf{P}^e + \mathbf{F}^d;$$

$$\dot{\boldsymbol{\Lambda}} = \boldsymbol{\Lambda} \circ \boldsymbol{\omega} / 2; \quad \mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{G} = \mathbf{M}^g + \mathbf{M}^e + \mathbf{T}^d.$$

Здесь кватернион $\boldsymbol{\Lambda}$ представляет ориентацию КРМ в ИСК, вектор $\mathbf{G} = \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{H}$, где \mathbf{H} – вектор КМ СГК; векторы \mathbf{P}^e и \mathbf{M}^e представляют тягу и момент ДУМТ, $\mathbf{M}^g \equiv -\mathbf{H}^*$ – момент

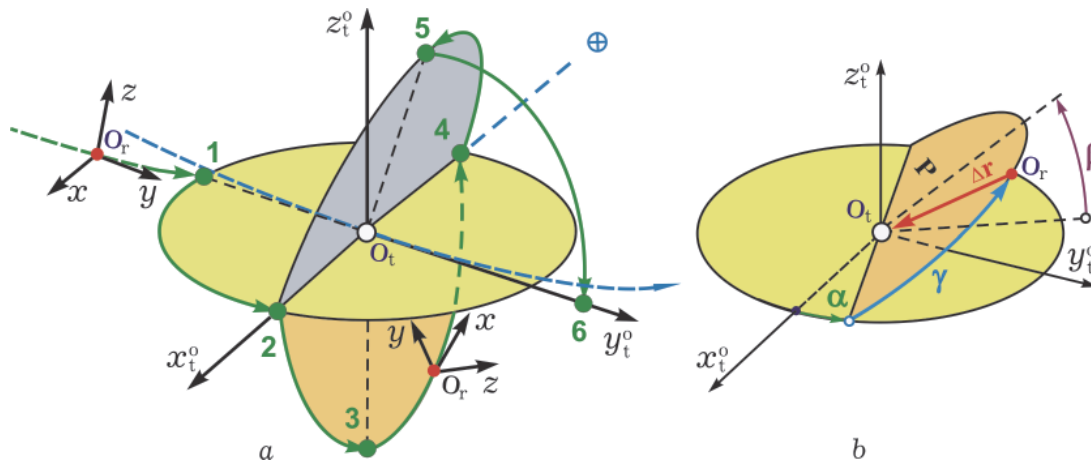


Рис. 1. Схема перелётов КРМ при визуальной инспекции состояния геостационарного спутника

СГК, а \mathbf{F}^d и \mathbf{T}^d – векторы внешних возмущающих сил и моментов и используется символ $(\cdot)^*$ локальной производной по времени.

Расположение цели в ССК робота определяется вектором $\Delta \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_t(t) - \mathbf{r}_r(t)$, см. рис. 1b, а разность их скоростей – вектором $\Delta \mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_t(t) - \mathbf{v}_r(t)$. При законе углового наведения робота, заданного кватернионом $\Lambda^p(t)$, погрешность ориентации его ССК O_rxyz определяется кватернионом $\mathbf{E} = (e_0, \mathbf{e}) = \tilde{\Lambda}^p \circ \Lambda$ при $\mathbf{e} = \{e_i\}$, которому соответствуют матрица ошибки ориентации $\mathbf{C}^e = \mathbf{I}_3 - 2[\mathbf{e} \times] \mathbf{Q}_e^t$, где $\mathbf{Q}_e = \mathbf{I}_3 e_0 + [\mathbf{e} \times]$, вектор модифицированных параметров Родрига (МПП) $\boldsymbol{\sigma}^e = \{\sigma_i^e\} = \mathbf{e}/(1 + e_0) = \mathbf{e}^e \operatorname{tg}(\Phi^e/4)$ с ортом \mathbf{e}^e оси Эйлера и углом Φ^e собственного поворота, а также вектор угловой погрешности $\delta \boldsymbol{\phi} = \{\delta \phi_i\} = \{4\sigma_i^e\}$.

Применяемые дискретные алгоритмы широко-импульсного управления траекторным движением КРМ и цифрового управления его ориентацией подробно представлены в [1]. В данной статье решаются две задачи: 1) синтез законов наведения КРМ для инспекционного облёта геостационарного спутника с последовательным наблюдением его состояния из шести точек с заданных расстояний, рис. 1a; 2) анализ динамики СУД робота при таком облёте.

ЗАКОНЫ НАВЕДЕНИЯ РОБОТА

В ОСК цели траекторные перемещения КРМ между инспекционными наблюдениями спутника удобно задавать плоскостью \mathbf{P} , положение которой назначается фиксированными углами α и β на рис. 1b, и расположением полюса O_r КРМ в этой плоскости, которое определяется углом $\gamma(t)$ и модулем $s(t) = \Delta r(t)$ вектора $\mathbf{s}(t) = -\Delta \mathbf{r}(t)$, см. рис. 1b. Задача пространственного наведения КРМ состоит в программ-

ном расположении $\mathbf{s}^p(t) = -\Delta \mathbf{r}^p(t)$ полюса O_r КРМ в плоскости \mathbf{P} ОСК цели и в программной ориентации оси $O_r y$ по орту вектора $\Delta \mathbf{r}^p$, когда ось $O_r z$ ССК робота направлена по нормали к плоскости перемещения его полюса O_r .

Пусть номер $j = 1 \div 5$ перелёта (перехода) между точками инспекции соответствует точке завершения предыдущего наблюдения, см. рис. 1a. При j -ом перелёте КРМ заданной длительности T_j вектор его расположения $\mathbf{s}_j^p(t)$ определяется углом $\gamma_j^p(t)$ в плоскости, заданной углами α_j и β_j , и расстоянием $s_j^p(t)$ от цели. Угол $\gamma_j^p(t)$ изменяется от начального $\gamma_{ij}^p = \gamma_j^p(t_{ij})$ до конечного $\gamma_{fj}^p = \gamma_j^p(t_{ij} + T_j)$ значения, а расстояние $s_j^p(t)$ – от начального значения $s_{ij}^p = s_j^p(t_{ij})$ до конечного $s_{fj}^p = s_j^p(t_{ij} + T_j)$. При таком перелёте столбец $\mathbf{s}_j^p(t)$ координат центра масс КРМ определяется в ОСК $O_r x_t^o y_t^o z_t^o$ цели с помощью ортогональной матрицы $\mathbf{Q}_j = [\alpha_j]_3^t [\beta_j]_1^t [\gamma_j^p(t)]_3^t$.

При крайних условиях

$$\dot{\gamma}_{ij}^p, \dot{\gamma}_{fj}^p; \dot{\gamma}_{ij}^p = \dot{\gamma}_{fj}^p = 0; \gamma_{fj}^p = \dot{\gamma}_{fj}^p = 0;$$

$$s_{ij}^p, s_{fj}^p; \dot{s}_{ij}^p = \dot{s}_{fj}^p = 0; \dot{s}_{fj}^p = \dot{s}_{fj}^p = 0$$

назначаются сплайны $\gamma_j^p(t)$ и $s_j^p(t)$ с заданными ограничениями на модули первых и вторых производных по времени, что позволяет по явным соотношениям вычислить векторы программных поступательных перемещений, скоростей и ускорений КРМ относительно ОСК цели.

Эти векторы сначала представляются в ИСК, к ним добавляются соответствующие кинематические параметры движения цели и также по явным соотношениям вычисляются векторы расположения, скорости и ускорения КРМ в ИСК. Наконец, с помощью стандартного кинематического преобразования искомые законы наведения робота в его траекторном движении представляются в ССК O_rxyz

в виде программных векторов расположения $\Delta \mathbf{r}^p(t) = -\mathbf{s}^p(t)$, скорости $\Delta \mathbf{v}^p = \{\Delta v_i^p\}$ и ускорения $\mathbf{w}^p = \{w_i^p\}$. Далее аналогично [1] вычисляются разности между расположениями цели и КРМ $\Delta \mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_t(t) - \mathbf{r}_r(t)$, их скоростями $\Delta \mathbf{v}(t) = \mathbf{v}_t(t) - \mathbf{v}_r(t)$ и разности $\Delta \mathbf{r}^p(t) = \mathbf{r}_t^p(t) - \mathbf{r}_r^p(t)$, $\Delta \mathbf{v}^p(t) = \mathbf{v}_t^p(t) - \mathbf{v}_r^p(t)$, а также вектор дискретного рассогласования $\delta \Delta \mathbf{r}_s = \Delta \mathbf{r}_s^p - \Delta \mathbf{r}_s$ между программной разностью $\Delta \mathbf{r}_s^p \equiv \Delta \mathbf{r}^p(t_s)$ и измеренной разностью $\Delta \mathbf{r}_s \equiv \Delta \mathbf{r}(t_s)$ с периодом T_u^c в моменты времени t_s , $s \in \mathbb{N}_0$. Аналогичный приём с применением векторных сплайнов используется при синтезе программных изменений кватерниона $\Lambda^p(t)$, векторов угловой скорости $\boldsymbol{\omega}^p = \{\omega_i^p\}$ и углового ускорения $\boldsymbol{\varepsilon}^p = \{\varepsilon_i^p\}$ робота, а также при формировании вектора угловой погрешности $\delta \Phi_k$.

Пусть на интервале времени $t \in [14468, 24268]$ с

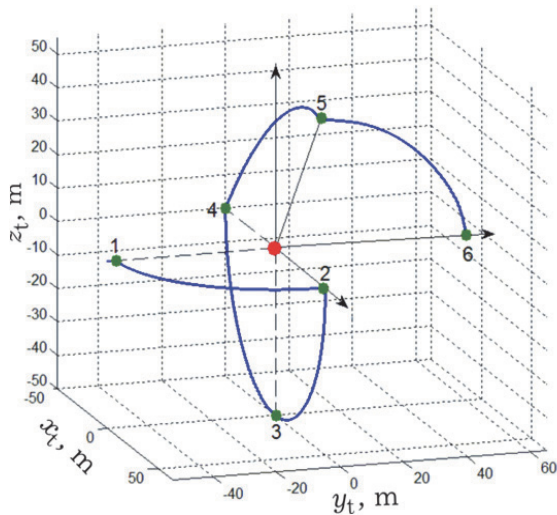


Рис. 2. Траектория перемещения КРМ в ОСК цели

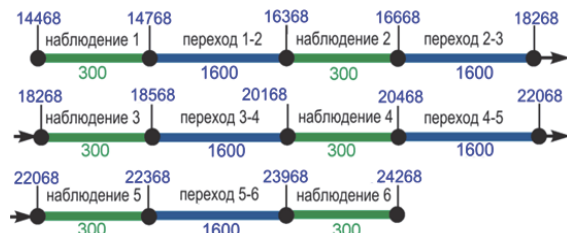


Рис. 3. Временная диаграмма требуемых перелётов КРМ и наблюдений состояния спутника

необходимо выполнить инспекцию технического состояния геостационарного спутника на основе наблюдений из шести точек, заданных в окрестности цели. На рис. 2 представлена пространственная программная траектория требуемых перелётов КРМ в ОСК цели, полученная в компьютерной среде *MatLab*. Временная диаграмма перелётов и наблюдений КРМ приведена на рис. 3, где переходы КРМ между шестью точками наблюдения отмечены синим цветом, а участки наблюдения, где КРМ стабилизируется в ОСК цели, выделены зеленым цветом. В верхней части диаграммы указано текущее время, а в нижней части – длительности наблюдений и перелётов. Здесь длительность j -го перелёта принята одинаковой $T_j = 1600$ с $\forall j = 1 \div 5$, также как и длительность 300 с (5 минут) наблюдения геостационарного спутника из каждой точки, см. рис. 1 а и 2. Заданные кинематические параметры перелётов КРМ при инспекции состояния спутника приведены в табл. 1.

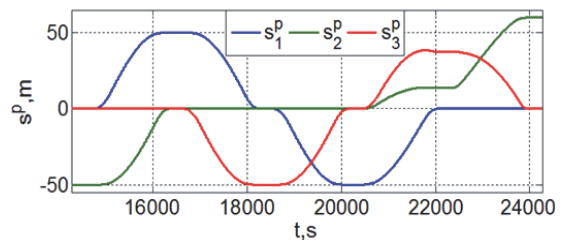


Рис. 4. Программные координаты КРМ в ОСК цели

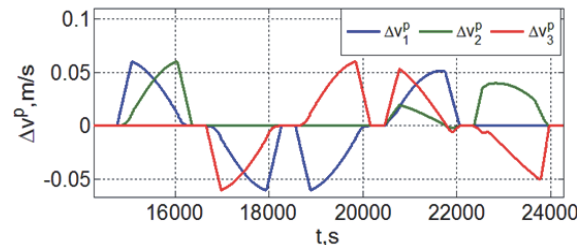


Рис. 5. Скорости КРМ относительно ОСК цели

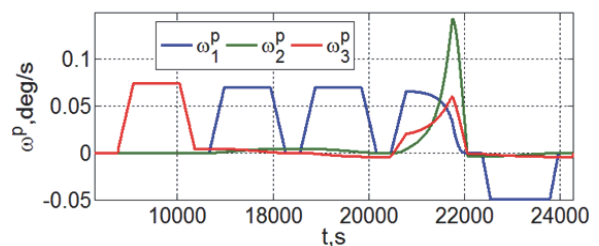


Рис. 6. Программные угловые скорости КРМ

Таблица 1. Параметры перелётов космического робота при инспекции состояния цели

j , #перелёта	α_j , град	β_j , град	γ_i^p , град	γ_f^p , град	s_i^p , м	s_f^p , м
1	0	0	-90	0	50	50
2	0	-90	0	90	50	50
3	0	-90	90	180	50	50
4	0	70	180	90	50	40
5	90	90	70	0	40	60

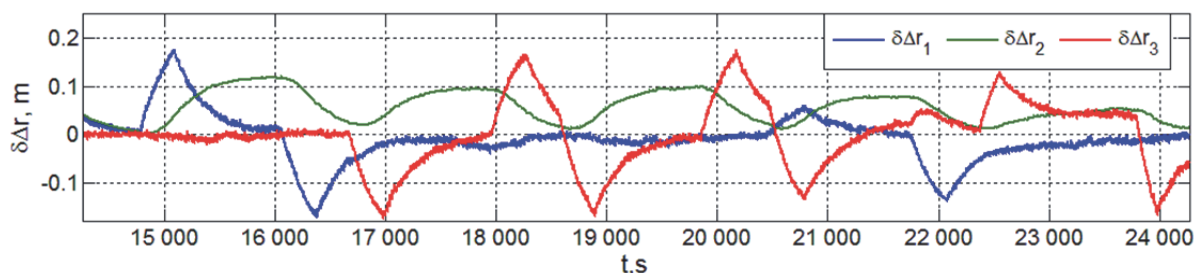


Рис. 7. Погрешности реализации позиционного наведения КРМ при инспекции состояния цели

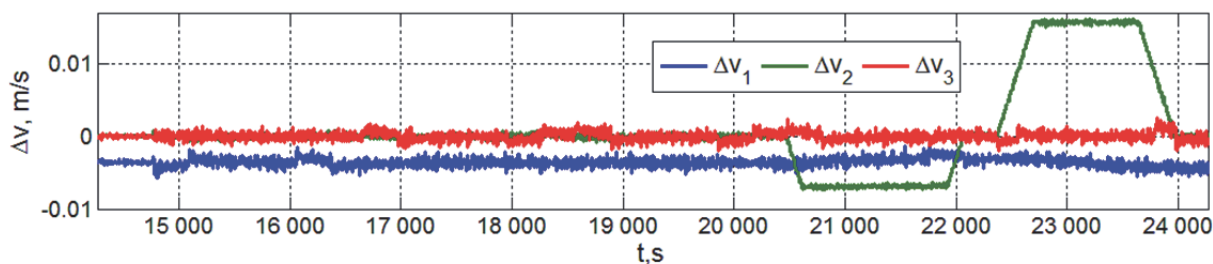


Рис. 8. Погрешности реализации закона наведения КРМ по скорости поступательного движения

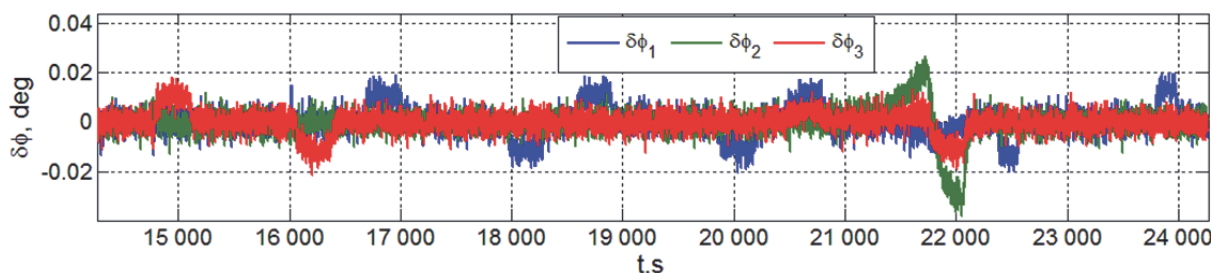


Рис. 9. Погрешности реализации углового наведения КРМ при инспекции состояния цели

На рис. 4 – 6 представлены некоторые результаты автономного расчета на борту КРМ законов его пространственного наведения, полученные по указанным исходным данным. Здесь и далее цветом выделены изменения переменных по рысканию (синий, ось x), крену (зеленый, ось y) и тангажу (красный цвет, ось z).

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПРИ ИНСПЕКЦИИ ЦЕЛИ

При компьютерной имитации нелинейных процессов управления движением робота с массой $m = 3000$ кг и тензором инерции $\mathbf{J} = \text{diag}(3248, 2348, 3640)$ кгм² с учетом шумов измерений и внешних возмущений применялись период ШИМ тяги РД в составе ДУМТ $T_u^c = 4$ с при запаздывании $T_{zu}^c = 0.25$ с и период цифрового управления ГД в составе SGK $T_u = 0.25$ с. На рис. 7 – 9 представлены некоторые результаты, демонстрирующие показатели точности СУД в процессе визуальной инспекции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко представлены методы наведения и управления пространственным движением космического робота в процессе облёта геостационарного спутника при инспекции его состояния, а также численные результаты по эффективности созданных алгоритмов. Здесь следует выделить оригинальный приём параметризации перелётов робота между точками визуальной инспекции, который используется при синтезе законов наведения, и простые робастные алгоритмы управления движением робота, обеспечивающие требуемые показатели позиционной и угловой точности при выполнении инспекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Сомов С.Е. Цифровое и широтно-импульсное управление космическим роботом при сближении с геостационарным спутником // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 5. С. 74-78.

**A SPACE ROBOT CONTROL AT VISUAL MONITORING
THE STATE OF A GEOSTATIONARY SATELLITE**

© 2020 Ye.I. Somov^{1,2}, S.A. Butyrin^{1,2}, T.Ye. Somova²

¹ Samara Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

² Samara State Technical University, Samara, Russia

Methods for guidance and motion control of a space robot during a flyby of a geostationary satellite at a visual monitoring its technical state are considered. Numerical results are presented that demonstrate the effectiveness of the developed discrete guidance and control algorithms.

Key words: a space robot, a geostationary satellite, a visual monitoring the state, control.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-79-83

Yevgeny Somov, Leading Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; Head of Department for "Navigation, Guidance, and Motion Control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail e_somov@mail.ru

Sergey Butyrin, Senior Researcher of Department "Dynamics and Motion Control", Samara Federal Research Centre, Russian Academy of Sciences; Head of Laboratory for "Modeling of Control Systems", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail butyrinsa@mail.ru

Tatyana Somova, Researcher of Department "Navigation, Guidance and Motion Control", Research Institute for Problems of Mechanical Systems Reliability, Samara State Technical University. E-mail te_somova@mail.ru