

УДК 629.4.06

КОМПЕНСАЦИЯ ВОЗМУЩАЮЩИХ МОМЕНТОВ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМИ СКОРОСТЯМИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛИ

В. Н. Трофименко, А. А. Волкова, К. С. Лавриненко, В. В. Медведко

Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Актуальной задачей представляется получение структуры комбинированного управления при угловом положении летательного аппарата для линейных динамических объектов. Показана последовательность комбинированного управления стабилизацией угловых скоростей осесимметричного летательного аппарата. Основы этого алгоритма: принцип объединенного максимума и метод прогнозирующей модели. Проанализированы графики отклонений угловых скоростей в задаче управления угловым положением летательного аппарата под воздействием возмущающих моментов. Отмечено, что для формирования компенсирующих усилий следует оценить возмущающие моменты. При этом нужно исходить из оптимизации функционала обобщенной работы по алгоритму с прогнозирующей моделью. Представлены результаты исследования алгоритма управления угловыми скоростями беспилотного летательного аппарата по методу прогнозирующей модели с ограничениями на управляющие моменты. Подтверждена работоспособность алгоритма. Его эффективность обусловлена уменьшением угловых ускорений и необходимой мощности исполнительных органов, снижением затрат на управление при потере точности требуемых значений угловых скоростей.

Ключевые слова: летательный аппарат, комбинированное управление, возмущающие моменты, угловые скорости, прогнозирующая модель, объединенный принцип максимума.

COMPENSATION OF DISTURBING MOMENTS IN THE PROBLEM OF CONTROLLING THE ANGULAR VELOCITY OF AN AIRCRAFT BASED ON A PREDICTIVE MODEL

V. N. Trofimenko, A. A. Volkova, K. S. Lavrinenko, V. V. Medvedko

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

An urgent issue is to obtain a combined control structure when controlling the angular position of an aircraft for linear dynamic objects. The paper presents an algorithm for the combined control of the stabilization of the angular velocities of an axisymmetric aircraft. The algorithm is implemented on the basis of the combined maximum principle and the predictive model method. The article presents an analysis of the graphs of angular velocity deviations in the problem of controlling the angular position of an aircraft under the influence of disturbing moments. It is noted that for the formation of compensating efforts, disturbing moments should be evaluated. At the same time, it is necessary to proceed from the optimization of the functionality of the generalized work on the algorithm with a predictive model. The results of the study of the algorithm for controlling the angular velocities of an unmanned aerial vehicle by the method of a predictive model with constraints on control moments are presented. The performance of the algorithm has been confirmed. The effectiveness of the algorithm lies in reducing the required power of the executive bodies, in reducing the cost of control with a loss of accuracy in achieving the required values of angular velocities, in decreasing angular accelerations.

Keywords: aircraft, combined control, disturbing moments, angular velocities, predictive model, combined maximum principle

Введение. В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) широко используются в различных отраслях. Их задействуют для мониторинга сельскохозяйственных угодий и лесных пространств, в археологии и градостроительстве, геологоразведке и горнодобыче, контроле автомобильных трасс, железных дорог и пр. [1, 2]. БПЛА относятся к сложным техническим системам. При синтезе схем управления такими объектами большую роль играет повышение эффективности алгоритмов управления, включая управление угловыми скоростями. Оптимальные решения позволяют минимизировать затраты на управление и время регулирования.

Среди схем оптимального управления [3] высокой вычислительной эффективностью отличаются алгоритмы:

— с прогнозирующей моделью (ПМ) на основе оптимизации функционала обобщенной работы [4, 5];

— на основе объединенного принципа максимума (ОПМ) [6].

Для осесимметричного ЛА, динамика которого описывается нелинейными дифференциальными уравнениями, получены аналитические законы управления по методу ПМ [7–9] и на основе объединенного принципа максимума [10]. В алгоритмах на основе ОПМ [6, 10] учитываются ограничения на управления. Однако управления реализуются по релейной схеме, и этим обусловлен скользящий режим. Алгоритмы на основе ПМ свободны от скользящего режима, следовательно, точность управления выше [11].

Однако моделирование алгоритма на основе ПМ выполнялось без учета возмущающих моментов. Как известно, в условиях возмущающих воздействий ухудшается качество управления [12] и увеличиваются его ошибки. Это обусловлено тем, что управление по отклонению ослабляет, но не устраняет влияние возмущающего воздействия. Большие ошибки управления могут привести к срыву выполнения функциональных задач ЛА.

В данной работе представлены результаты моделирования комбинированного управления угловыми скоростями ЛА с каналом компенсации возмущающих моментов. Решение реализовано на основе алгоритма с ПМ.

Основная часть

Влияние возмущающих моментов на качество управления. Рассмотрим алгоритм управления угловыми скоростями осесимметричного ЛА по методу прогнозирующей модели [7, 8].

Угловое движение осесимметричного ЛА описывается уравнениями [13]:

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega}_1 + A\omega_2\omega_3 &= u_1, & \omega_1(t) \Big|_{t=t_0} &= \omega_{10}, \\
 \dot{\omega}_2 - A\omega_1\omega_3 &= u_2, & \omega_2(t) \Big|_{t=t_0} &= \omega_{20}, \\
 \dot{\omega}_3 &= u_3, & \omega_3(t) \Big|_{t=t_0} &= \omega_{30},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где A — приведенный момент инерции; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и u_1, u_2, u_3 — угловые скорости и приведенные управляющие моменты как функции времени, составляющие векторы ω и u соответственно.

Оптимальное управление u_0 , минимизирующее функционал обобщенной работы

$$J = \int_{t_0}^{t_1} (\omega^T Q \omega) dt + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} (u^T K^{-1} u + u_0^T K^{-1} u_0) dt \tag{2}$$

и останавливающее вращение ЛА, определяется выражениями:

$$u_{o1}(t) = -k_1 \left\{ \omega_1 (q_1 + q_2)(t_1 - t) - \frac{q_1 - q_2}{2\alpha} [\omega_1 \sin 2\beta - \omega_2 (\cos 2\beta) - 1] \right\}, \quad (3)$$

$$u_{o2}(t) = -k_2 \left\{ \omega_2 (q_1 + q_2)(t_1 - t) + \frac{q_1 - q_2}{2\alpha} [\omega_2 \sin 2\beta - \omega_1 (\cos 2\beta) - 1] \right\}, \quad (4)$$

$$u_{o3}(t) = -k_3 \left\{ 2\omega_3 q_3 (t_1 - t) + 0,25\alpha^{-2} (q_1 - q_2) [(\omega_2^2 - \omega_1^2) \times \right. \\ \left. \times (\sin 2\beta - 2\beta \cos 2\beta) - 4\omega_1 \omega_2 (\cos 2\beta + 2\beta \sin 2\beta - 1)] \right\}. \quad (5)$$

Здесь $\beta = A\omega_3(t) \cdot (t - t_1)$; k_1, k_2, k_3 — диагональные элементы матрицы K ; q_1, q_2, q_3 — диагональные элементы Q .

На рис. 1 показаны результаты моделирования управления по алгоритму (3)– (5).

Представлена динамика угловых скоростей без возмущающих моментов (а) и при их воздействии (б).

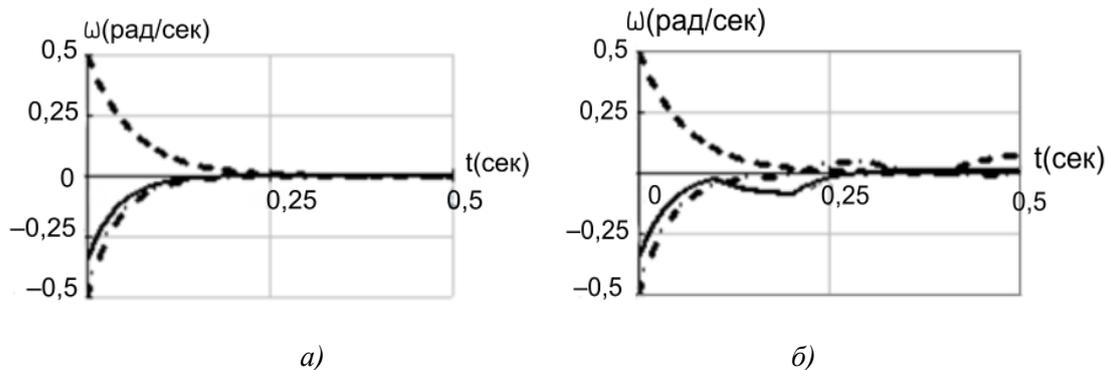


Рис. 1. Динамика угловых скоростей без возмущений (а) и с возмущениями без компенсации (б)

Возмущающие моменты моделировались прямоугольными импульсами по трем каналам со значениями: $-2,5 \text{ сек}^{-2}$ на интервале $(0,1; 0,2)$ сек; $1,5 \text{ сек}^{-2}$ на интервале $(0,2; 0,3)$ сек; $1,5 \text{ сек}^{-2}$ на интервале $(0,4; 0,5)$ сек.

Анализ графиков показывает, что во время действия возмущающих моментов появляются неустранимые отклонения угловых скоростей. Отклонения достигают значения $0,1 \text{ сек}^{-1}$. Их устраняет система управления после окончания действия возмущений.

Учет и компенсация возмущающих моментов позволит уменьшить отклонения угловых скоростей.

Компенсация возмущений. Для компенсации возмущающих моментов воспользуемся алгоритмом оценивания возмущений на основе метода с прогнозирующей моделью [14–16].

Исходные уравнения динамики для задачи оценивания:

$$\begin{aligned}
 \dot{\omega}_1 + A\omega_2\omega_3 - u_{01} &= m_1, & \omega_1(t) \Big|_{t=t_0} &= \omega_0, \\
 \dot{\omega}_2 - A\omega_1\omega_3 - u_{02} &= m_2, & \omega_2(t) \Big|_{t=t_0} &= \omega_0, \\
 \dot{\omega}_3 - u_{03} &= m_3, & \omega_3(t) \Big|_{t=t_0} &= \omega_0,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где u_{01} , u_{02} , u_{03} — приведенные управляющие моменты, определяемые в соответствии с выражениями (3)– (5); m_1 , m_2 , m_3 — неизвестные возмущающие моменты по соответствующим осям (компоненты вектора m).

По методу ПМ оценки возмущающих моментов \hat{m}_1 , \hat{m}_2 , \hat{m}_3 определяются на основе оптимизации функционала обобщенной работы:

$$J[\hat{\omega}] = \int_{t_0}^{t_1} \Psi(\hat{\omega}) dt + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \hat{m}^T R^{-1} \hat{m} dt + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \hat{m}_0^T R^{-1} \hat{m}_0 dt, \quad \Psi(\hat{\omega}) = (\omega - \hat{\omega})^T P (\omega - \hat{\omega}), \tag{7}$$

где $\hat{\omega}$ — оценка угловых скоростей; \hat{m}_0 — оптимальная оценка возмущения, определяемая в процессе синтеза; R , P — положительно определенные диагональные матрицы весовых коэффициентов.

Задача оценивания сводится к определению таких возмущающих моментов \hat{m}_0 , которые бы минимизировали функционал (7). Фактически это постановка задачи оптимального управления следующей моделью в ускоренном времени s :

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{\omega}}_1 + A\hat{\omega}_2\hat{\omega}_3 - u_{01} &= \hat{m}_1, & \hat{\omega}_1(s) \Big|_{s=t_0} &= \omega_{01}, \\
 \dot{\hat{\omega}}_2 - A\hat{\omega}_1\hat{\omega}_3 - u_{02} &= \hat{m}_2, & \hat{\omega}_2(s) \Big|_{s=t_0} &= \omega_{02}, \\
 \dot{\hat{\omega}}_3 - u_{03} &= \hat{m}_3, & \hat{\omega}_3(s) \Big|_{s=t_0} &= \omega_{03}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

В соответствии с методом прогнозирующей модели оценка \hat{m}_0 для задачи (6)– (7) определяется из выражения:

$$\begin{aligned}
 m_0(t) &= -R \cdot \int_t^{t+t_w} \Phi^T(s, t) \cdot \frac{\partial}{\partial \omega_m} (\Psi(\omega_m, s)) \cdot ds = \\
 &= -2R \cdot \int_t^{t+t_w} \Phi^T(s, t) \cdot P \cdot (\omega - \omega_m) \cdot ds.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Здесь t_w — окно оценивания; $\omega_m \equiv \omega_m(s)$ — прогнозируемая динамика объекта (8) при нулевых возмущающих моментах (свободное движение объекта в ускоренном времени s):

$$\omega_m(s) \Big|_{s=t} = \omega(t). \tag{10}$$

$\Phi(s, t)$ — фундаментальная матрица системы, определяемая из уравнения:

$$\frac{\partial \Phi(s,t)}{\partial s} = E_{\omega} \cdot \Phi(s,t), \quad \Phi(s,t)|_{s=t} = I, \quad (11)$$

в котором E_{ω} — матрица Якоби уравнения динамики объекта (8).

На рис. 2 представлена структура комбинированного управления. Управляющее устройство содержит:

- канал формирования управления угловыми скоростями в соответствии с алгоритмом (3)– (5);
- канал формирования компенсирующих моментов, вычисляемых по (9).

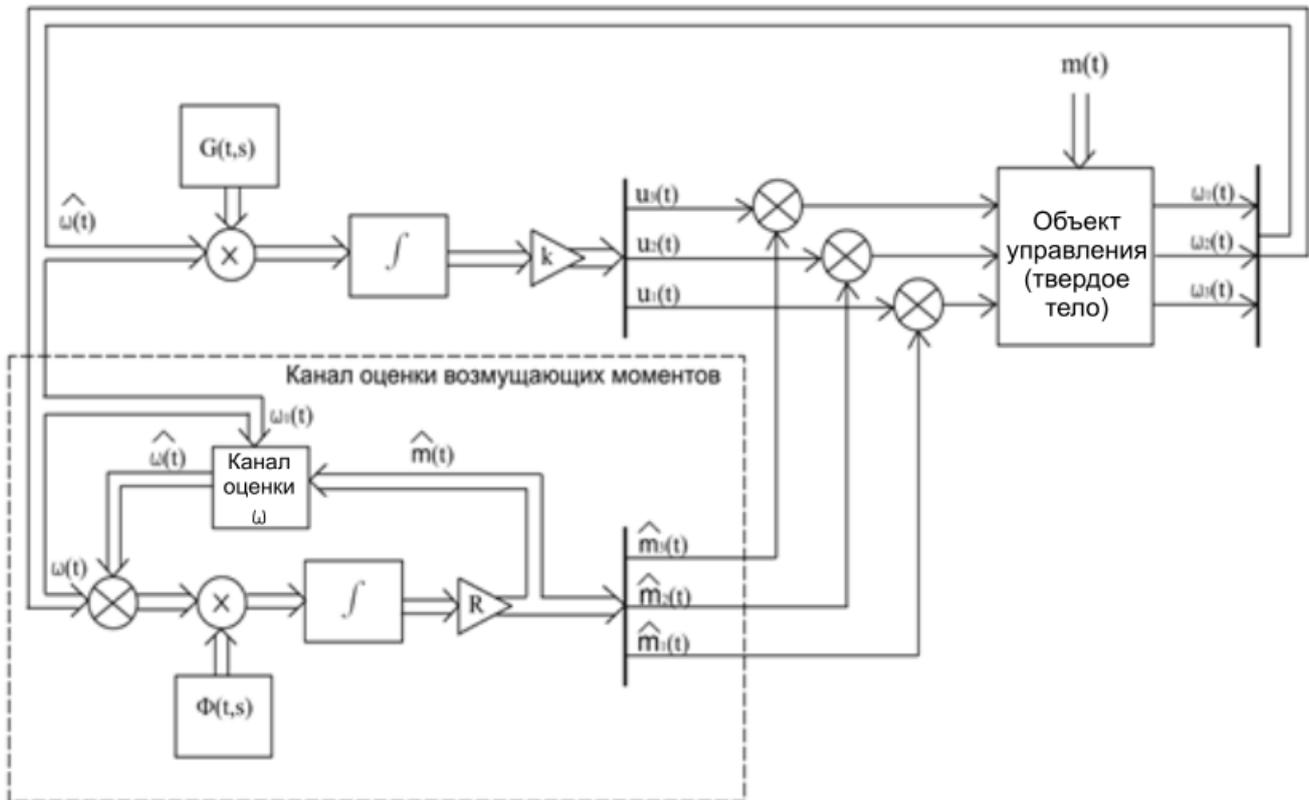


Рис. 2. Структура комбинированного управления

На рис. 3 показаны результаты моделирования комбинированного управления. Это графики отклонений угловых скоростей от траекторий, представленных на рис. 1а, полученных без дополнительного канала компенсации и с каналом компенсации возмущающих моментов.

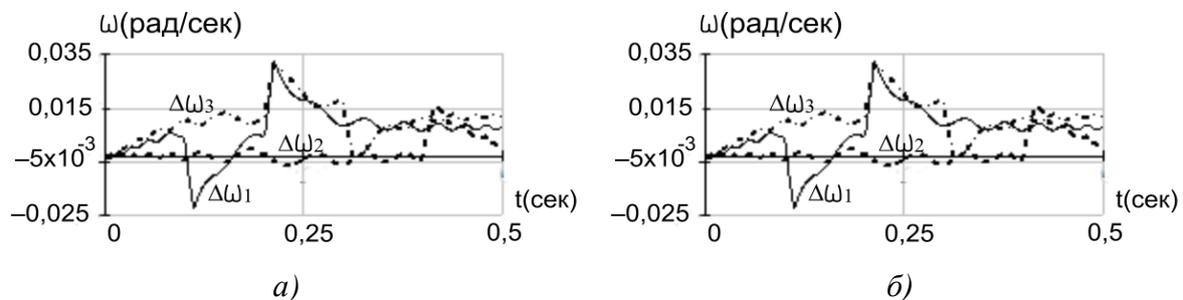


Рис. 3. Отклонения угловых скоростей без компенсации (а) и с компенсацией (б) возмущающих моментов

Анализ графиков показывает, что комбинированное управление во время действия возмущающих моментов уменьшает отклонения угловых скоростей более чем в два с половиной

раза. Выбросы в отклонениях на рис. 3б вызваны задержкой получения оценок, которая определяется размером окна оценивания [17].

Выводы. Итоги работы позволяют сделать приведенные ниже выводы.

— Формирование компенсирующих усилий дает возможность уменьшить отклонения угловых скоростей в задаче управления угловым положением ЛА при воздействии возмущающих моментов.

— Для создания компенсирующих усилий нужна оценка возмущающих моментов, которая базируется на оптимизации функционала обобщенной работы по алгоритму с прогнозирующей моделью.

Представленную структуру комбинированного управления можно использовать при регулировании углового положения беспилотного ЛА.

Библиографический список

1. Бойко, А. Области применения беспилотников / А. Бойко // RoboTrends : [сайт]. — URL: <http://robotrends.ru/robopedia/oblasti-primeneniya-bespilotnikov> (дата обращения: 06.12.2020).
2. Farooq, U. The second drone age / U. Farooq // The Intercept : — URL: <https://theintercept.com/2019/05/14/turkey-second-drone-age/> (accessed: 06.12.2020).
3. Васильев, Ф. П. Лекции по методам решения экстремальных задач / Ф. П. Васильев. — Москва : Изд-во Московского университета, 1974. — 374 с.
4. Кларк, Д. Применение обобщенного прогнозирующего управления к производственным процессам / Д. Кларк // IEEEControlSystems. — 1988. — Vol. 8, № 2. — С. 49–55.
5. Юнусова, С. Т. Алгоритм синтеза прогнозирующего управления электромеханическим объектом / С. Т. Юнусова, Р. Н. Измайлова, У. Ф. Мамиров // Молодой ученый : [сайт]. — 2016. — № 3 (107). — С. 238–241. — URL: <http://moluch.ru/archive/107/25623/> (дата обращения: 06.12.2020).
6. Kostoglotov, A. A. Joint maximum principle in the problem of synthesizing an optimal control of nonlinear systems / A. A. Kostoglotov, A. I. Kostoglotov, S. V. Lazarenko // Automatic Control and Computer Sciences. — 2007. — Vol. 41. — P. 274–281.
7. Таран, В. Н. Синтез оптимального алгоритма угловой стабилизации методом прогнозирующей модели / В. Н. Таран, В. Н. Трофименко // Автоматика и телемеханика. — 1997. — № 5. — С. 82–85.
8. Taran, V. Transport systems intellectualization based on analytical control synthesis of angular velocities for the axisymmetric spacecraft / V. Taran, V. Trofimenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2018. — Vol. 680. — P. 154–160.
9. Агапов, А. А. Синтез алгоритма управления космическим аппаратом на основе функционала обобщенной работы по методу прогнозирующей модели / А. А. Агапов, А. А. Волкова, В. Н. Трофименко // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России («ТрансПромЭк-2019»): тр. междунар. науч.-практ. конф. к 90-летию Ростовского государственного университета путей сообщения. — Ростов : Изд-во РГУПС, 2019. — С. 25–29.
10. Kostoglotov, A. Method for synthesis of optimal attitude stabilization algorithm based on joint maximum principle / A. Kostoglotov // Automatic Control and Computer Sciences. — 2002. — № 5 (36). — P. 21–28.
11. Kostoglotov, A. Fuzzy topological approach to a solid control task / A. Kostoglotov, V. Taran, V. Trofimenko // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2019. — Vol. 874. — P. 373–381.

12. Тихонравов, М. К. Основы теории полета и элементы конструкции искусственных спутников Земли / М. К. Тихонравов, И. М. Яцунский. — Москва : Машиностроение, 1967. — 294 с.

13. Trofimenko, V. N. Algorithm for air density estimation by measuring parameters of test body movement based on the criteria of the minimum of generalized work functional / V. N. Trofimenko, K. V. Trofimenko // Sixth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics. — 1999. — Vol. 3983 // Spie : — URL: <https://spie.org/Publications/Proceedings/Volume/3983?SSO=1> (accessed: 03.11.2021).

14. Таран, В. Н. Определение параметров движения летательного аппарата по косвенным измерениям на основе функционала Красовского / В. Н. Таран, В. Н. Трофименко, Е. Н. Трофименко // Теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики : мат-лы XI междунар. науч.-практ. конф. — Новочеркасск : Лик, 2012. — С. 37–41.

15. Половинчук, Н. Я. Алгоритм оценивания параметров траектории летательного аппарата / Н. Я. Половинчук, В. Н. Трофименко, С. В. Иванов // Двойные технологии. — 2014. — № 1 (66). — С. 30–33.

16. Taran, V. N. Generalized work functional in regularization of the estimation of the state of a dynamical system / V. N. Taran, V. N. Trofimenko, I. V. Trofimenko // Automatic Control and Computer Sciences. — 1999. — Vol. 33, № 4. — P. 30–39.

Об авторах:

Трофименко Владимир Николаевич, доцент кафедры «Радиоэлектроника» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, trofimvn@mail.ru

Волкова Анастасия Александровна, магистрант кафедры «Радиоэлектроника» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Nasty1998.nasty@mail.ru

Лавриненко Кристина Станиславовна, студент кафедры «Радиоэлектроника» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Love6324@mail.ru

Медведко Вероника Витальевна, студент кафедры «Радиоэлектроника» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Veronika.medvedko17@mail.ru

About the Authors:

Trofimenko, Vladimir N., Associate Professor, Department of Radio Electronics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Cand. Sci., trofimvn@mail.ru

Volkova, Anastasiya A., Master's degree student, Department of Radio Electronics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Nasty1998.nasty@mail.ru

Lavrinenko, Kristina S., Student, Department of Radio Electronics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Love6324@mail.ru

Medvedko, Veronika V., Student, Department of Radio Electronics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Veronika.medvedko17@mail.ru