

УДК 629.7.05

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В АВТОНОМНОЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ГИРОВЕРТИКАЛИ С ИНТЕГРАЛЬНОЙ КОРРЕКЦИЕЙ

*Алексей Григорьевич КУЗНЕЦОВ, д. т. н., доцент,
Виктор Иванович ГАЛКИН, к. т. н., с. н. с.,
Евгений Владимирович КУЗИН
ПАО «Московский институт электромеханики и автоматики»
E-mail: inbox@aomiea.ru*

В статье изложены результаты исследований автономной микромеханической гировертикали с интегральной коррекцией, в которой с целью повышения ее точностных характеристик осуществляется демпфирование Шулеровских колебаний. Показано, что при оптимальном выборе параметров обратной связи погрешности определения углов крена и тангажа можно свести к минимуму.

Ключевые слова: автономная гировертикаль, интегральная коррекция, демпфирование, период Шулера, микромеханические датчики.

OPTIMIZATION OF FEEDBACK PARAMETERS IN AN AUTONOMOUS MICROMECHANICAL VERTICAL GYRO WITH INTEGRAL CORRECTION

*Alexey G. KUZNETSOV, D. Sc. in Engineering,
Victor I. GALKIN, PhD in Engineering,
Evgeniy V. KUZIN
'Moscow Institute of Electromechanics and Automatics' PJSC
E-Mail: inbox@aomiea.ru*

This article presents the results of an autonomous micromechanical vertical gyro with integral correction research. Schuler oscillations are damped to increase the vertical gyro accuracy. It is shown that the errors in determining the roll and pitch angles can be minimized if the feedback parameters are chosen optimally.

Keywords: autonomous vertical gyro, integral correction, damping, Schuler period, micromechanical sensors.

Введение

Основным преимуществом автономных курсовертикалей с интегральной коррекцией является их невозмущаемость от действия линейных ускорений, что позволяет по сравнению с радиальной коррекцией избегать отключения обратной связи, компенсирующей погрешности датчиков, и не накапливать ошибок определения углов ориентации, возрастающих пропорционально времени отключения обратной связи [1].

Автономная гировертикаль с интегральной коррекцией представляет собой не демпфированную систему регулирования, что вызывает гармонические колебания погрешности измерения углов ориентации с периодом Шулера и амплитудой, пропорциональной величине погрешности датчиков первичной информации — гироскопов и акселерометров [2]:

$$\Delta\vartheta = \Delta\gamma = (\omega_{др} / \omega_{sch}) \sin\omega_{sch}t, \quad \Delta\vartheta = \Delta\gamma = \frac{a_0}{R\omega_{sch}^2}(1 - \cos\omega_{sch}t),$$

где: $\omega_{др}$ — угловая скорость дрейфа гироскопа; ω_{sch} — частота Шулера; a_0 — нулевой сигнал акселерометра; R — радиус Земли.

Одним из способов сведения к минимуму амплитуды этих колебаний в автономной гировертикале может быть осуществление демпфирования Шулеровских колебаний путем введения соответствующих элементов в контур обратной связи системы регулирования [3].

В настоящей статье изложены результаты исследования такого способа повышения точности измерения углов ориентации автономной гировертикали с интегральной коррекцией и результаты поиска оптимальных параметров обратной связи системы регулирования.

Структурно-функциональная схема гировертикали с корректирующими звеньями

Блок-схема автономной гировертикали с интегральной коррекцией и демпфированием Шулеровских колебаний представлена на рис. 1.

По информации об угловых скоростях в связанной системе координат $\omega_{x1,y1,z1}$, поступающей из трехосного блока микромеханических датчиков угловых скоростей, в блоке 1 формируется цифровая платформа, выдающая углы ориентации в инерциальной системе координат в виде матрицы направляющих косинусов A

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}.$$

Матрица направляющих косинусов A передается в блоки 2 и 4. В блоке 2 производится интегрирование поступающих из трехосного акселерометра линейных ускорений в связанной системе координат $a_{x1,y1,z1}$ и пересчет кажущихся линейных скоростей $W_{x1, y1, z1}$ на инерциальные оси X,Y с помощью матрицы направляющих косинусов:

$$\Delta W_X = a_{11} \cdot W_{x1} + a_{12} \cdot W_{y1} + a_{13} \cdot W_{z1};$$

$$\Delta W_Y = a_{21} \cdot W_{x1} + a_{22} \cdot W_{y1} + a_{23} \cdot W_{z1}.$$

Определенные в процессе пересчета приращения линейных скоростей в инерциальных осях $\Delta W_{x,y}$ передаются в блок управления цифровой платформой 3

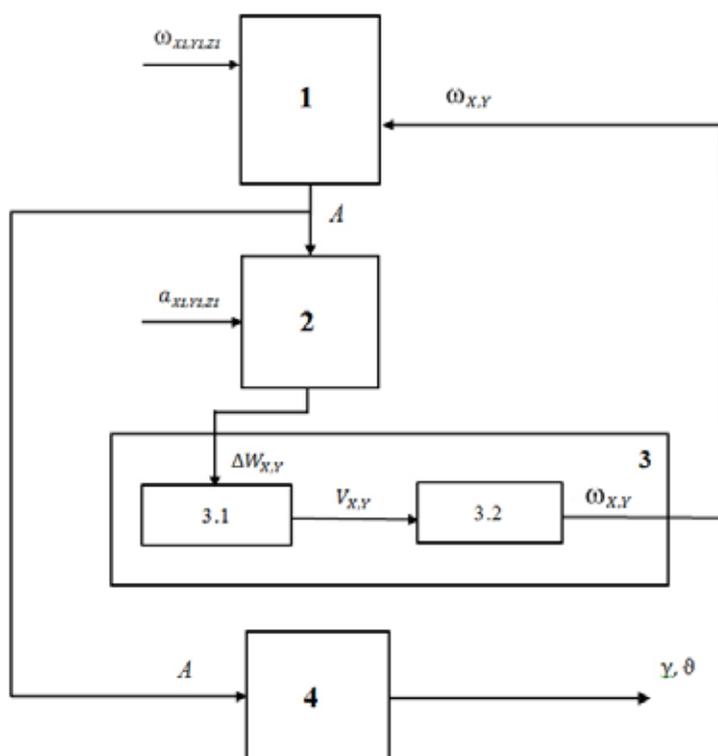


Рис. 1. Блок-схема автономной гировертикали с интегральной коррекцией:

- 1 — блок цифровой платформы;
- 2 — блок интегрирования и пересчета кажущихся скоростей на инерциальные оси;
- 3 — блок управления цифровой платформой, состоящий из:
 - 3.1 — субблока вычисления и демпфирования линейных скоростей в инерциальной системе координат,
 - 3.2 — субблока вычисления угловых скоростей управления цифровой платформой и их усиления;
- 4 — блок вычисления углов тангажа и крена

В блоке 3 производится вычисление угловых скоростей управления цифровой платформой в инерциальных осях следующим образом. По поступающим из блока 2 приращениям линейных скоростей $\Delta W_{x,y}$ в субблоке 3.1 рассчитываются суммарные линейные скорости на инерциальных осях $V_{x,y}$ с введением демпфирующего звена в виде:

$$V_X(n_3) = V_X(n_3 - 1) - K_d V_X(n_3 - 1)h_3 + \Delta W_X(n_3);$$

$$V_Y(n_3) = V_Y(n_3 - 1) - K_d V_Y(n_3 - 1)h_3 + \Delta W_Y(n_3),$$

где: $K_d V_{X,Y}(n_3 - 1)h_3$ — демпфирующее звено; $K_d [1/c]$ — коэффициент динамического усиления (демпфирования); h_3 — временной интервал тактовой частоты вычисления углов ориентации, n_3 — номер такта.

В субблоке 3.2 по результатам расчета линейной скорости в субблоке 3.1 производится расчет компенсирующей угловой скорости $\omega_{x,y}$, вызванной ошибками измерений гироскопов и акселерометров, угловой скоростью облета и вращения Земли. Для сведения к минимуму статических ошибок в обратную связь системы регулирования вводится усилительное звено. При пренебрежении эллиптичностью Земли выражение для расчета угловой скорости, компенсирующей указанные погрешности, запишется в виде:

$$\omega_X(n_3) = -K_c \frac{V_Y(n_3)}{R} + U_X; \quad \omega_Y(n_3) = K_c \frac{V_X(n_3)}{R} + U_Y,$$

где: K_c — коэффициент усиления; U_Y, U_X — составляющие угловой скорости вращения Земли на инерционных осях; R — радиус Земли.

Угловая скорость управления платформой $\omega_{x,y}$ из блока 3 передается в блок цифровой платформы 1, где и производится корректировка углового положения цифровой платформы, рассчитанной по показаниям гироскопов.

В блоке 4, используя передаваемую из блока 1 матрицу направляемых косинусов, производится вычисление углов тангажа ϑ и крена γ и выдача их потребителю:

$$\vartheta(n_3) = \arctg \frac{a_{31}(n_3)}{\tilde{a}_0(n_3)}; \quad \gamma(n_3) = \arcsin \frac{a_{33}(n_3)}{\tilde{a}_0(n_3)},$$

где $\tilde{a}_0 = \sqrt{a_{32}^2(n_3) + a_{33}^2(n_3)}$.

Результаты исследований влияния корректирующих звеньев на величину ошибок измерения углов тангажа и крена

Исследования проводились методом математического моделирования. Оценивалось влияние коэффициентов усиления корректирующих звеньев на статические и динамические погрешности измерения углов тангажа и крена.

На рис. 2 показан характер изменения статических и динамических ошибок определения угла тангажа при разных значениях коэффициента динамического усиления K_d , но постоянной величине коэффициента статического усиления $K_c = 64$. При этом дрейф гироскопа принимался для всех вариантов постоянным, равным $0,0071 \text{ }^\circ/\text{с}$, соответствующий используемым в гировертикале микромеханическим гироскопам.

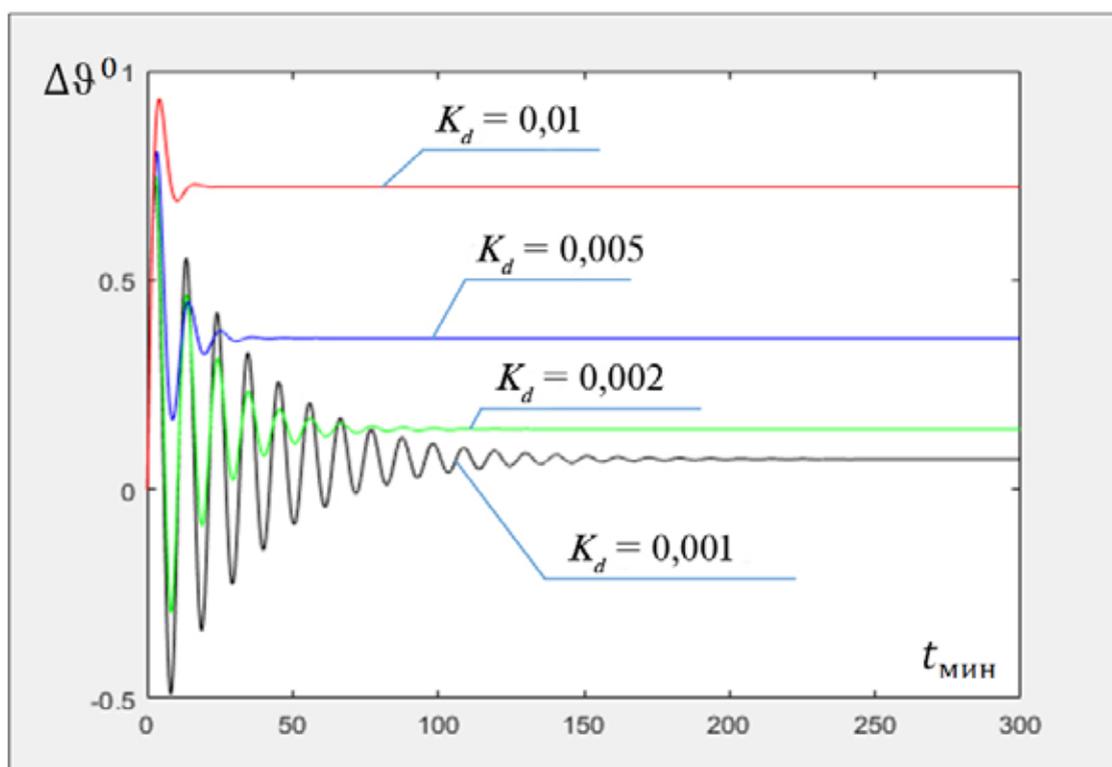


Рис. 2. Графики изменения погрешностей тангажа во времени при постоянном статическом коэффициенте усиления $K_c = 64$ и ряде значений коэффициента динамического усиления K_d

На рис. 3 показаны такие же графики, что и на рис. 2, но при коэффициенте статического усиления, равном $K_c = 32$.

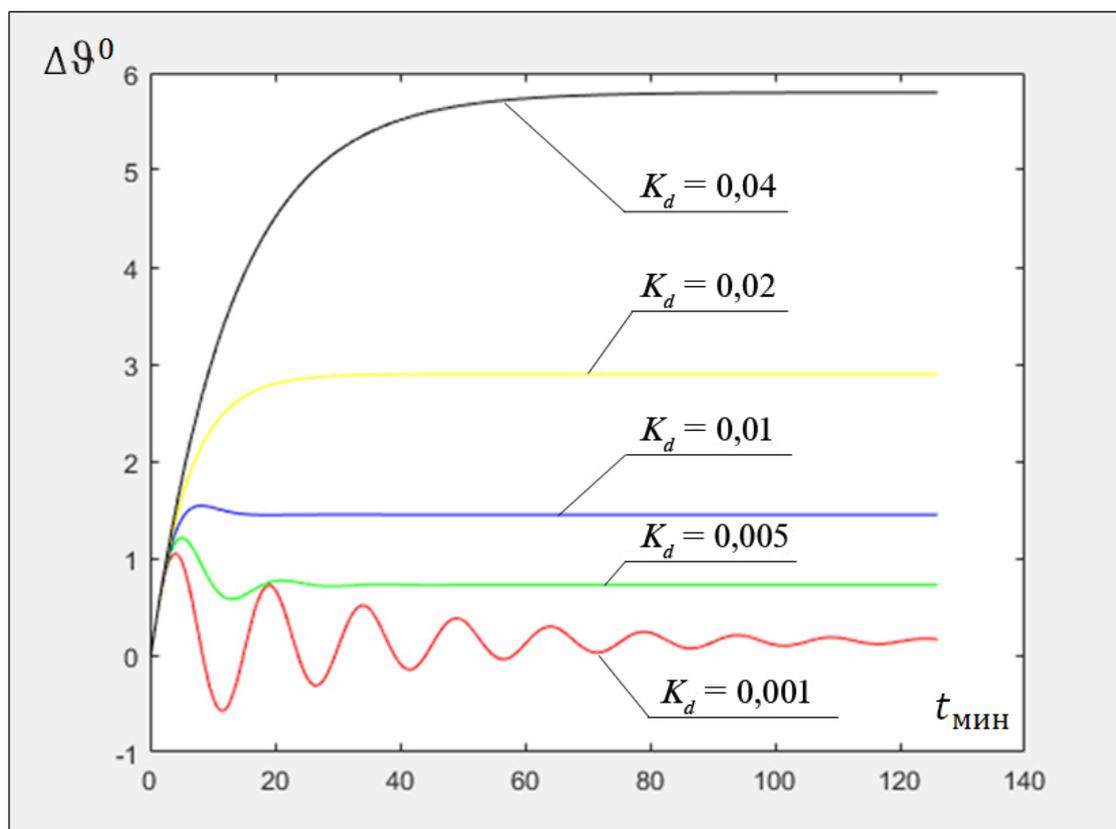


Рис. 3. Графики изменения погрешностей тангажа во времени при постоянном статическом коэффициенте усиления $K_c = 32$ и ряде значений коэффициента динамического усиления K_d

Как следует из приведенных графиков, при неизменном коэффициенте статического усиления K_c и с увеличением коэффициента динамического усиления K_d динамическая погрешность тангажа уменьшается, а статическая погрешность растет. Необходимо найти оптимальное значение коэффициентов усиления.

Оптимизация параметров обратной связи гировертикали

Критерием оптимальности значений коэффициентов статического и динамического усиления выбрано равенство статических и динамических погрешностей определения углов тангажа и крена.

Как показали исследования, это условие оптимальности выполняется в точке пересечения графиков зависимости $\Delta\theta_c = f(K_d)$ и $\Delta\theta_d = f(K_d)$ при постоянном значении статического коэффициента усиления K_c .

На рис. 4 построены такие графики для двух значений коэффициентов усиления $K_c = 32$ и $K_c = 64$ на примере угла тангажа.

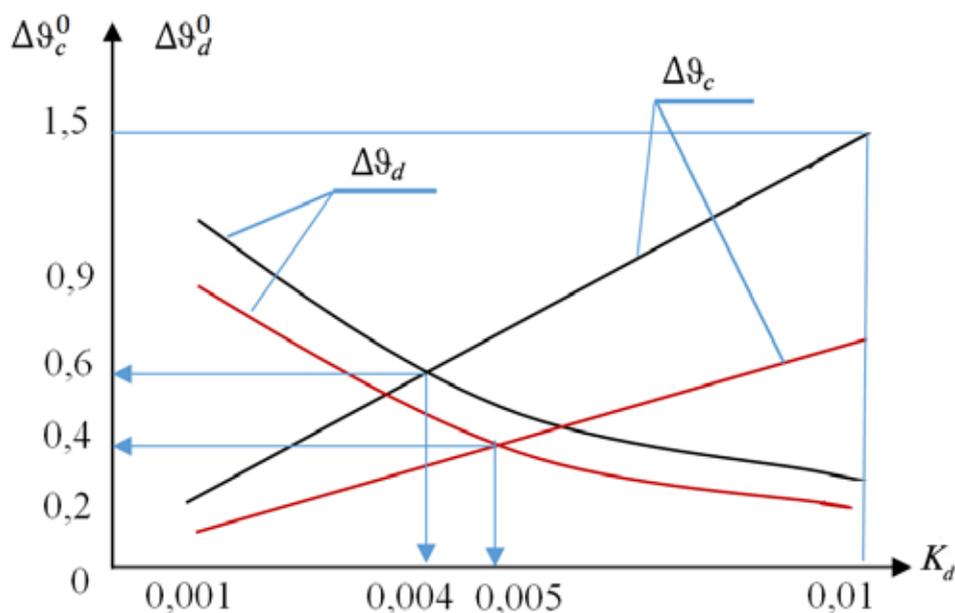


Рис. 4. Определение оптимальных коэффициентов усиления интегральной коррекции угла тангажа:

$\Delta\vartheta_c = f(K_d)$ — график зависимости статической погрешности измерения тангажа от динамического коэффициента усиления при постоянном K_c ;

$\Delta\vartheta_d = f(K_d)$ — график зависимости динамической погрешности измерения тангажа от динамического коэффициента усиления при постоянном K_c ;

— графики для коэффициента статического усиления $K_c = 32$;

— графики для коэффициента статического усиления $K_c = 64$

Зависимость коэффициентов для угла крена идентична показанным на графике. Как следует из этого рисунка, для $K_c = 32$ оптимальным значением коэффициента динамического усиления является $K_d = 0,004$. При этом статическая и динамическая угловые погрешности будут равны друг другу и составят величину $\Delta\vartheta_c = \Delta\vartheta_d = 0,6^\circ$.

Для $K_c = 64$ оптимальным будет значение $K_d = 0,005$. При этом статическая и динамическая погрешности будут равны: $\Delta\vartheta_c = \Delta\vartheta_d = 0,4^\circ$. То есть, с ростом K_c оптимальное значение K_d будет также расти, снижая ошибки определения угла.

На рис. 5 приведены графики изменения погрешности определения тангажа во времени:

1 — при отсутствии демпфирования ($K_d = 0, K_c = 1$);

2 — при оптимальных значениях коэффициентов усиления ($K_d = 0,005, K_c = 64$).

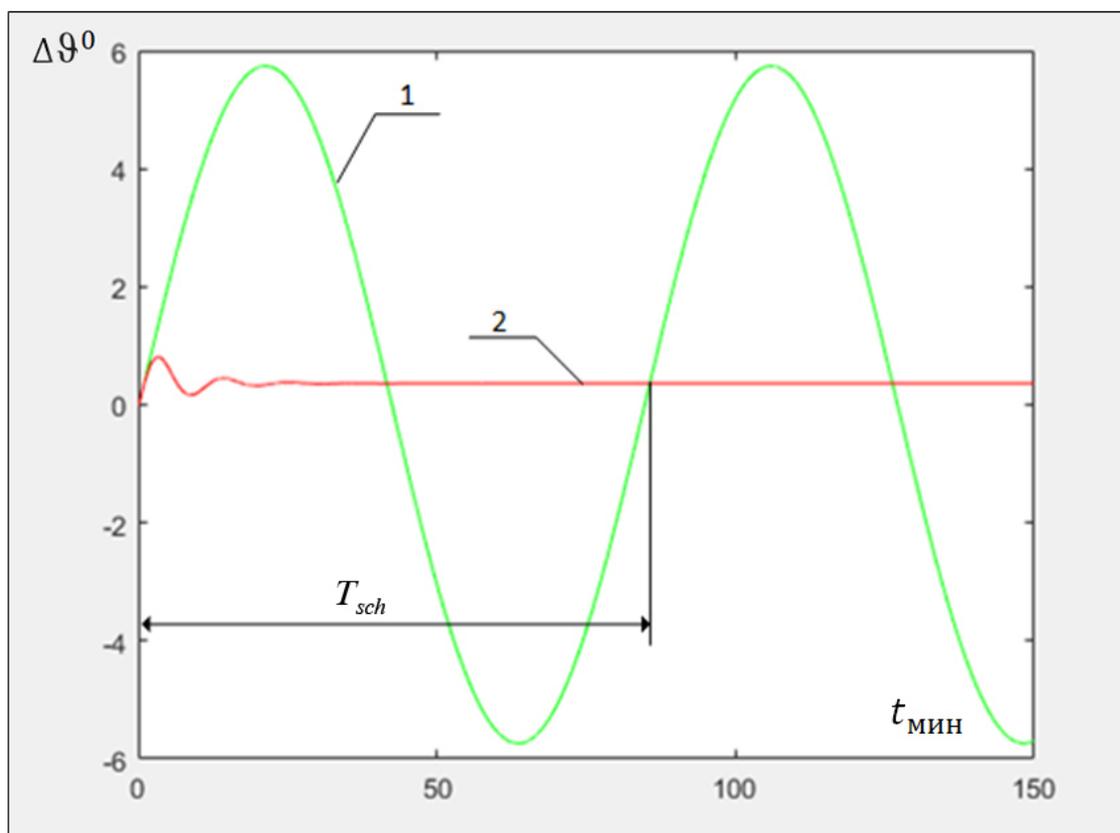


Рис. 5. Графики изменения погрешности измерения тангажа во времени $\Delta\theta = f(t)$ автономной гировертикали с интегральной коррекцией:
 график 1 — при отсутствия демпфирования;
 график 2 — при оптимальных коэффициентах усиления $K_d = 0,005$ 1/с и $K_c = 64$ с
 одинаковым дрейфом датчика угловых скоростей по оси Z_1 , равном $\Delta\omega_{z1} = 0,0071$ °/с;
 $T_{sch} = 84,4$ мин — период Шулера

Как видно из приведенных графиков, введение корректирующих звеньев позволило более чем на порядок уменьшить угловую динамическую ошибку, приравняв ее к величине статической ошибки.

Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что, осуществляя демпфирование Шулеровских колебаний, можно существенно уменьшить угловую погрешность автономных гировертикалей с интегральной коррекцией. Это особенно важно при использовании микромеханических датчиков с нестабильными и некомпенсированными нулевыми сигналами и масштабными коэффициентами.

Литература

1. *Кузнецов А. Г., Галкин В. И., Кузин Е. В.* Сравнительные характеристики автономных микромеханических курсовертикалей с радиальной и интегральной коррекцией. Навигация и управление летательными аппаратами. № 33, 2021. – С. 52–63.
2. Инерциальная навигация, под редакцией К. Ф. О’Донелла, перевод с английского, изд. «Наука», 1969. – 592 с.
3. *Галкин В. И., Кузин Е. В.* Способ повышения точностных характеристик автономной бесплатформенной гировертикали с интегральной коррекцией и устройство для его реализации, Заявка на изобретение № 2021128523 от 29.09.2021 г.