

УДК 531.383

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Чуб Елена Григорьевна,
ассистент кафедры высшей математики,
e-mail: elenachub11@gmail.com,
ДГТУ, Ростов-на-Дону

В статье представлена впервые построенная стохастическая модель движения гиросtabilизированной платформы, позволяющая решить проблему контроля параметров железнодорожного пути на основе использования высокоточной инерциальной навигационной системы.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, гиросtabilизированная платформа, параметры Родрига-Гамильтона

DOI 10.21777/2500-2112-2018-1-56-64

Безопасность движения железнодорожного транспорта в настоящее время тесно связана с внедрением инерциальных технологий. Эффективность методов наблюдения за развитием дефектов пути и прогнозирования их состояния повышается за счет увеличения числа инерциальных элементов и систем, устанавливаемых на путеизмерительных средствах. В путеизмерительной технике наиболее перспективным является использование инерциальных навигационных систем (ИНС), построенных на основе гиросtabilизированной платформы. Несмотря на несомненные преимущества таких ИНС при их использовании в составе подвижных измерительных систем актуальной является проблема точности измерений навигационных приборов, работающих в условиях действия внутренних шумов и внешних возмущающих воздействий.

В данной статье представлена полученная впервые стохастическая модель движения гиросtabilизированной платформы, которая может быть использована в подвижных измерительных системах, обеспечивающих безопасность движения железнодорожного транспорта.

Новая модель позволяет решить проблему контроля параметров железнодорожного пути за счет использования инерциальных технологий.

Преимущества данной модели:

- представление вектора состояния ИНС в параметрах Родрига-Гамильтона в форме «объект-наблюдатель» позволяет сократить приборный состав и упрощает использование современных субоптимальных методов обработки информации и управления в подвижных измерительных системах;
- применение субоптимальных алгоритмов обеспечивает точность более высокого порядка решения задачи начальной ориентации ИНС подвижной измерительной системы в условиях действия возмущений, что улучшает качество определения параметров железнодорожного пути.

Инерциальные технологии при определении параметров рельсового пути

Инерциальные методы применяются при определении таких параметров пути, как:

- ширина рельсовой колеи;
- просадки рельсовых нитей;
- взаимное положение рельсовых нитей по высоте (поперечный уровень);
- рихтовка или стрелы изгиба в плане от несимметричной хорды;
- уклон продольного профиля оси пути;
- перекосы пути на базе ходовой тележки (короткие неровности);
- перекосы пути на базе кузова вагона-лаборатории (длинные неровности);
- кривизна пути в плане.

Развитие инерциальных технологий идет по двум направлениям: использование бескарданных инерциальных навигационных систем (БИНС) и гиросtabilизированной платформы (ГСП).

К потенциальным преимуществам БИНС относятся [4]: отсутствие сложной электромеханической системы, уменьшение габаритов, массы и энергопотребления, повышение надежности и ремонтнопригодности, сокращение времени начальной выставки, повышение универсальности системы, меньшая стоимость системы, упрощение решения задачи резервирования и контроля работоспособности системы и ее элементов, отсутствие ошибок, обусловленных погрешностями стабилизации гироплатформы и неточностью изготовления карданова подвеса. В то же время БИНС обладает значительным перечнем недостатков, а именно:

- высокие требования, предъявляемые к точности чувствительного элемента и диапазону изменения измеряемых параметров;
- значительно больший объем вычислений, вызванный необходимостью аналитического моделирования опорной системы координат и преобразования сигналов акселерометров и гироскопов;
- сложность считывания выходных сигналов при большом диапазоне их измерения;
- дополнительные трудности калибровки чувствительного элемента в связи с изменением ориентации их осей чувствительности по отношению к направлению вектора силы тяжести;
- отсутствие совершенных методов начальной ориентации (выставки) и калибровки системы.

Кроме того, при непосредственном креплении чувствительных элементов на путеизмерительном вагоне-лаборатории они подвергаются более сильным возмущающим воздействиям, чем при установке их на гиросtabilизированную платформу (ГСП).

Использование в составе измерительных комплексов навигационных систем на основе гиросtabilизированной платформы обеспечивает наличие следующих преимуществ:

- высокоточную начальную ориентацию ИНС подвижной измерительной системы;
- обеспечение решения задачи навигации подвижной измерительной системы в условиях значительных перегрузок;
- обеспечение для чувствительных элементов, размещенных на ГСП, точность измерений на 2–3 порядка выше по сравнению с чувствительными элементами, расположенными непосредственно на подвижной измерительной системе;
- использование вычислителей с меньшей производительностью, а за счет этого более стойких к внешним возмущениям.

Анализ этих направлений показывает, что для путеизмерительной техники **наиболее перспективным** является использование инерциальных навигационных систем, построенных на основе **гиросtabilизированной платформы**.

Построение модели движения гиросtabilизированной платформы

Из них наиболее обоснованной теоретически и проработанной экспериментально является модель скорости ухода, полиномиально зависящая от ускорений [1, 5]

$$\omega_{yx} = R - U_z g_y + U_y g_z - U_x g_x + (K_{zz} - K_{yy}) g_z g_y + K_{zy} g_y^2 - K_{yz} g_z^2 + K_{zx} g_x g_y - K_{xy} g_x g_z + W.$$

Однако ее непосредственное применение для определения ориентации навигационной системы не позволяет проанализировать изменения во времени скорости дрейфа ГСП в зависимости от перегрузок, что необходимо в ряде практически важных случаев.

Для решения этой задачи введем в рассмотрение следующие правые системы координат (рисунок 1) [1]:

$O\xi\eta\zeta$ – неврещающуюся (инерциальную) правую СК (ИСК) I ;

$ONLE$ – астрономическую правую СК (АСК) T , связанную с Землей, начало которой совпадает с центром подвеса платформы;

$OXYZ$ – гироскопическую правую СК (ГСК) J , связанную с платформой;

Ox_yz_i – правую СК, связанную с i -м гироскопом платформы, имеющим кинетический момент H_i (рисунок 2).

Для большей наглядности анализа движения некорректируемой платформы положим, что в начальный момент времени соответствующие орты первых трех СК совпадают (рисунок 1) – как показа-

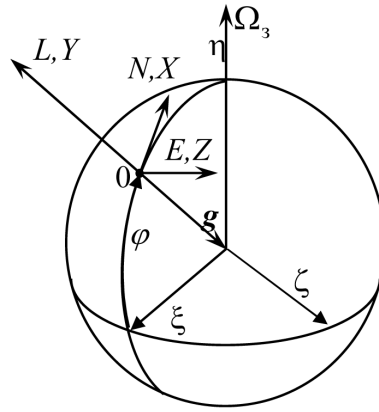


Рисунок 1 – Исходная ориентация систем координат

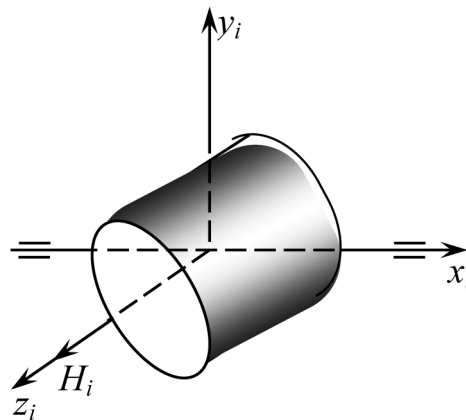


Рисунок 2 – К определению уходов гироскопов

но далее, это не вносит принципиальных изменений в построение модели движения гиросtabilизированной платформы.

Движение платформы (изменение ее текущей ориентации) будем рассматривать в ИСК. Т.к. положение астрономического трехгранника в ИСК для произвольного момента времени может быть точно определено (Земля вращается с постоянной скоростью $\Omega_3, 7,29 \times 10^{-5} \text{ рад/с}$, широта места расположения ГСП φ известна, в начальный момент времени орты трехгранников совпадают), то, зная текущую ориентацию платформы в ИСК, определить ее положение в АСК не представляет никаких трудностей [3].

Используем при описании модели движения некорректируемой платформы следующие допущения, не влияющие принципиально на ход последующих построений:

- расположение гироскопов на платформе ортогональное (рисунок 3);
- скорость собственного ухода каждого гироскопа ω_i (рисунок 3) описывается трехмерным полиномом второй степени от ускорений

$$\omega_i = R_i - U_{z_i} g_{y_i} + U_{y_i} g_{z_i} - U_{x_i} g_{x_i} + (k_{z_i z_i} - k_{y_i y_i}) g_{z_i} g_{y_i} + k_{z_i y_i} g_{y_i}^2 - k_{y_i z_i} g_{z_i}^2 + k_{z_i x_i} g_{y_i} g_{x_i} - k_{y_i x_i} g_{x_i} g_{z_i}, \quad (1)$$

где $g_{x_i}, g_{y_i}, g_{z_i}$ – ускорения, направленные по соответствующим осям системы координат, связанной с i -м гироскопом (м/с^2); $i = 1, 2, 3$;

R_i – составляющая скорости ухода i -го гироскопа, не зависящая от ускорения (рад/с);

$U_{x_i}, U_{y_i}, U_{z_i}$ – коэффициенты влияния на уход ускорений, направленных по соответствующим осям $Ox_i y_i z_i$, в первой степени (рад/с \times г); $k_{z_i z_i}, k_{y_i y_i}, k_{z_i y_i}, k_{y_i z_i}, k_{z_i x_i}, k_{y_i x_i}$ – коэффициенты влияния на уход ускорений во второй степени (рад/с \times г 2);

g – ускорение земного тяготения;

- движение платформы в ИСК описывается поворотом первого рода (рисунок 3).

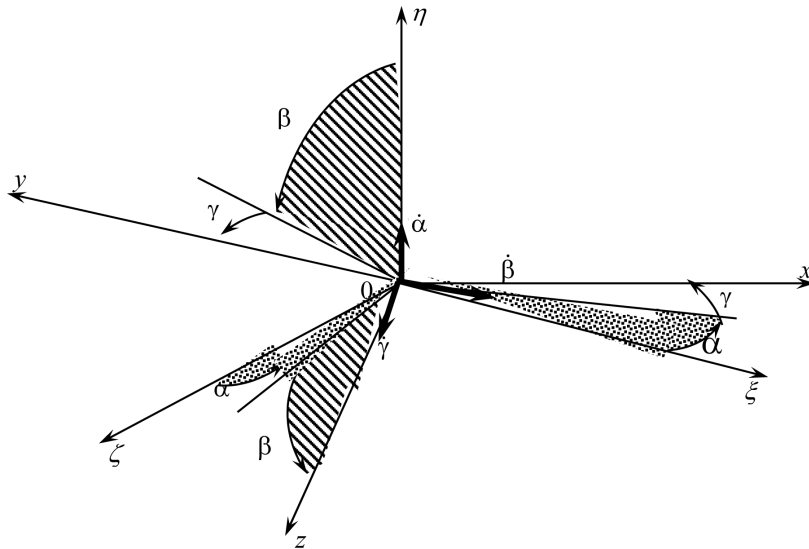


Рисунок 3 – Вращение гироскопического трехгранника в ИСК направленных по осям связанной с ним системы координат

Принципиально важно отметить, что степень полинома от ускорений не оказывает принципиального влияния на дальнейшее построение и вид динамической модели движения некорректируемой платформы. Это делает возможным использование более полного учета эффекта влияния ускорений на скорость ухода за счет повышения порядка полинома вида (1), позволяя построить модель скорости собственного ухода с заданной точностью.

Полагая для ясности последующих построений гироблоки идентичными и, исходя из выражений (1) и рисунка 3, представим далее проекции абсолютной угловой скорости собственного ухода платформы трехосного гиросtabilизатора на оси ГСК $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ в виде, аналогичном (1):

$$\begin{aligned} \omega_{\bar{o}} &= R_x - U_z g_x + U_x g_z + U_y g_y + (k_{zz} - k_{xx}) g_z g_x + k_{zx} g_x^2 - k_{xz} g_z^2 - k_{zy} g_x g_y + k_{xy} g_y g_z, \\ \omega_y &= R_y - U_z g_y + U_y g_z - U_x g_x + (k_{zz} - k_{yy}) g_y g_z + k_{zy} g_y^2 - k_{yz} g_z^2 + k_{zx} g_y g_x - k_{yx} g_x g_z, \\ \omega_z &= R_z - U_x g_z + U_z g_x - U_y g_y + (k_{xx} - k_{zz}) g_x g_z + k_{xz} g_z^2 - k_{zx} g_x^2 - k_{xy} g_z g_y + k_{zy} g_y g_x, \end{aligned} \quad (2)$$

где g_x, g_y, g_z – проекции ускорений на оси гироскопической системы координат, R_i – составляющие скорости ухода, не зависящие от перегрузок, U_i, k_{ij} ($i, j = x, y, z$) – коэффициенты полинома скорости ухода, определяющие зависимость от ускорений в первой и второй степенях, соответственно.

Для удобства последующего вывода уравнений состояния некорректируемой платформы представим уравнения (2) в векторной форме:

$$\omega = R + U g + g^T \hat{\otimes} K g,$$

где K – блочная матрица;

$\hat{\otimes}$ – знак блочного умножения;

$$g = (g_x \quad g_y \quad g_z)^T, \quad R = (R_x \quad R_y \quad R_z)^T, \quad U = \begin{pmatrix} -U_z & U_y & U_x \\ -U_x & -U_z & U_y \\ U_z & -U_y & -U_x \end{pmatrix}, \quad K = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{pmatrix};$$

$$K_1 = \begin{pmatrix} k_{zx} & -k_{zy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{xy} \\ k_{zz} - k_{xx} & 0 & -k_{xz} \end{pmatrix}, \quad K_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -k_{xy} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} - k_{yy} \\ 0 & 0 & -k_{yz} \end{pmatrix};$$

$$K_3 = \begin{pmatrix} -k_{xz} & 0 & k_{xx} - k_{zz} \\ -k_{zy} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{yx} & -k_{xz} \end{pmatrix}.$$

Для построения модели движения некорректируемой платформы необходимо определить через ее переменные текущую ориентацию ГСК относительно АСК. Для этого используют различные параметры, например, углы Эйлера-Крылова [5] и параметры Родрига-Гамильтона [5, 6]. Среди всех кинематических параметров особое место занимают параметры Родрига-Гамильтона. В отличие от углов Эйлера-Крылова эти параметры не вырождаются при любом положении твердого тела, они линейны, при их использовании отпадает необходимость в тригонометрических операциях, неизбежных при использовании углов Эйлера-Крылова. Все это значительно упрощает алгоритмы численного интегрирования кинематических уравнений [2].

В отечественной литературе аппарат параметров Родрига-Гамильтона впервые был применен в кинематике систем инерциальной навигации в работе [1], дальнейшие исследования были проведены в работах [2, 4]. Вместе с тем использование этих параметров для решения задачи ориентации некорректируемой платформы изучено в настоящее время недостаточно. В частности исследовалась возможность применения параметров Родрига-Гамильтона для решения задачи калибровки коэффициентов модели дрейфа некорректируемой ГСП. Но полученные результаты лежат в области построения детерминированных моделей вектора состояния некорректируемой платформы, которые, во-первых, не учитывают случайный характер возмущений, присутствующих в каналах измерений акселерометров, во-вторых, случайные изменения вектора g , обусловленные внутренними и внешними факторами и, в-третьих, априорно неопределенные сейсмические возмущения постоянно присутствующие на Земле и также носящие случайный характер.

Учитывая изложенные выше недостатки разработанных моделей, построим стохастический вектор состояния некорректируемой платформы с использованием параметров Родрига-Гамильтона в форме «объект-наблюдатель».

Взаимная текущая ориентация ГСК и ИСК может быть описана системой кинематических уравнений

$$\begin{pmatrix} \dot{m}_0 \\ \dot{m}_1 \\ \dot{m}_2 \\ \dot{m}_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -m_1 & -m_2 & -m_3 \\ m_0 & -m_3 & m_2 \\ m_3 & m_0 & -m_1 \\ -m_2 & m_1 & m_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $m = (m_0 \ m_1 \ m_2 \ m_3)^T$ – параметры Родрига-Гамильтона, или в векторно-матричной форме

$$\dot{m} = \frac{1}{2} \Phi(m) \omega, \quad (4)$$

$$\text{где } \Phi(m) = \begin{pmatrix} -m_1 & -m_2 & -m_3 \\ m_0 & -m_3 & m_2 \\ m_3 & m_0 & -m_1 \\ -m_2 & m_1 & m_0 \end{pmatrix}.$$

Текущую ориентацию АСК относительно ИСК также определяет вектор в параметрах Родрига-Гамильтона $l = (l_0 \ l_1 \ l_2 \ l_3)^T$, компоненты которого для рассматриваемого случая могут быть определены как

$$l_0 = \cos \frac{\phi}{2}, \ l_1 = p \sin \frac{\phi}{2}, \ l_2 = m \sin \frac{\phi}{2}, \ l_3 = n \sin \frac{\phi}{2}, \quad (5)$$

где p, m, n – направляющие косинусы.

В силу того, что триэдр T АСК вращается относительно триэдра I ИСК вокруг оси Мира со скоростью Ω_3 , направляющие косинусы равны

$$p = \cos \phi, \quad m = \sin \phi, \quad n = 0.$$

Следовательно, уравнения (5) можно записать в несколько ином виде

$$l_0 = \cos \frac{\Omega_\epsilon t}{2}, \quad l_1 = \cos \phi \sin \frac{\Omega_\epsilon t}{2}, \quad l_2 = \sin \phi \sin \frac{\Omega_\epsilon t}{2}, \quad l_3 = 0. \quad (6)$$

Для получения замкнутой системы уравнений движения НП определим во времени проекции вектор ускорений g на оси ГСК при известных проекциях вектора G на оси АСК.

Из матричного описания вращений следует, что

$$g = D(m)V(l)^T G, \quad (7)$$

где $V(l) = \begin{pmatrix} 2l_0^2 + 2l_1^2 - 1 & 2l_1l_2 & -2l_0l_2 \\ 2l_1l_2 & 2l_0^2 + 2l_2^2 - 1 & 2l_0l_1 \\ 2l_0l_2 & -2l_0l_1 & 2l_0^2 - 1 \end{pmatrix}$ – матрица конечного поворота трехгранника АСК относительно ИСК, записанная в параметрах Родрига-Гамильтона;

$D(m) = \begin{pmatrix} 2m_0^2 + 2m_1^2 - 1 & 2m_1m_2 + 2m_0m_3 & 2m_1m_3 - 2m_0m_2 \\ 2m_1m_2 - 2m_0m_3 & 2m_0^2 + 2m_2^2 - 1 & 2m_2m_3 + 2m_0m_1 \\ 2m_1m_3 + 2m_0m_2 & 2m_2m_3 - 2m_0m_1 & 2m_0^2 + 2m_3^2 - 1 \end{pmatrix}$ – матрица конечного поворота трехгранника ГСК относительно ИСК, также записанная в параметрах Родрига-Гамильтона.

Совокупность уравнений (4), (6), (7) представляет собой описание модели движения некорректируемой платформы на произвольных интервалах времени при полиномиальной зависимости скорости собственного ухода платформы от ускорений. Объединяя (4), (6), (7) в единую систему имеем:

$$\dot{m} = \frac{1}{2} \Phi(m) \left(R + UD(m)V^T(l)G + (D(m)V^T(l)G)^T \otimes D(m)V^T(l)G \right). \quad (8)$$

Для построения стохастической модели некорректируемой платформы, учтем случайный характер возмущений. Тогда уравнение (8) примет вид

$$\begin{aligned} \dot{m} = & \frac{1}{2} \Phi(m) \left(R + UD(m)V^T(l)G + (D(m)V^T(l)G)^T \otimes D(m)V^T(l)G \right) + \\ & + \frac{1}{2} \Phi(m) \left(UD(m)V^T(l)w + 2(D(m)V^T(l)G)^T \otimes D(m)V^T(l)w + W \right), \end{aligned} \quad (9)$$

В каноническом виде уравнение (9) имеет вид

$$\dot{m} = \tilde{F}(m, t) + \tilde{F}_0(m, t)\xi, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{F}(m, t) &= \frac{1}{2} \Phi(m) \left(R + UD(m)V^T(l)G_A + (D(m)V^T(l)G_A)^T \otimes D(m)V^T(l)G_A \right), \\ \tilde{F}_0(m, t) &= \frac{1}{2} \left[\Phi(m) \left(UD(m)V^T(l) + 2(D(m)V^T(l)G_A)^T \otimes D(m)V^T(l) \right) \middle| \Phi(m) \right]. \end{aligned}$$

По окончании синтеза уравнений вектора состояния в виде (10) с целью возможности последующего синтеза апостериорной плотности распределения необходимо получить уравнение наблюдателя в параметрах Родрига-Гамильтона.

$$\begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} = D(m)V(l)^T \begin{pmatrix} G_N \\ G_L \\ G_E \end{pmatrix} = C(m,l) \begin{pmatrix} G_N \\ G_L \\ G_E \end{pmatrix},$$

где $C(m,l) = D(m)V(l)^T$.

Последнее выражение преобразуется к виду

$$\begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} \cdot m - \begin{pmatrix} v_1^* \\ v_2^* \\ v_3^* \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $v_1^* = (2l_0^2 + 2l_1^2 - 1)G_N + 2l_1l_2G_L - 2l_0l_2G_E$;

$v_2^* = 2l_1l_2G_N + (2l_0^2 + 2l_2^2 - 1)G_L + 2l_0l_1G_E$;

$v_3^* = 2l_0l_2G_N - 2l_0l_1G_L + (2l_0^2 - 1)G_E$;

$$C_0 = 2 \begin{pmatrix} m_0v_1^* + m_3v_2^* - m_0v_3^* \\ m_3v_1^* + m_0v_2^* + m_1v_3^* \\ m_2v_1^* - m_1v_2^* + m_0v_3^* \end{pmatrix}, \quad C_1 = 2 \begin{pmatrix} m_1v_1^* + m_2v_2^* + m_3v_3^* \\ m_2v_1^* \\ m_3v_1^* \end{pmatrix}, \quad C_2 = 2 \begin{pmatrix} 0 \\ m_2v_2^* \\ m_3v_2^* \end{pmatrix}, \quad C_3 = 2 \begin{pmatrix} 0 \\ m_2v_3^* \\ m_3v_3^* \end{pmatrix}.$$

Обозначим через \tilde{q} и v соответственно векторы $\tilde{q} = \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix}$ и $v = \begin{pmatrix} v_1^* \\ v_2^* \\ v_3^* \end{pmatrix}$.

В качестве сигнала измерений также будем использовать показания акселерометров Z_a , расположенных на некорректируемой платформе. С учетом модели выходных сигналов акселерометров представим уравнение наблюдателя в виде

$$Z_a = \tilde{q} \cdot m - v + W_a,$$

или

$$Z_a + v = \tilde{q} \cdot m + W_a.$$

Вводя обозначения

$$Z = Z_a + v = \tilde{q} \cdot m + W_a,$$

запишем уравнения наблюдателя в каноническом виде

$$Z = \tilde{q} \cdot m + W_a. \quad (12)$$

Следует отметить некоторые преимущества построенной модели. Во-первых, уравнение (10) не имеет особых точек, присутствующих у модели в параметрах Эйлера-Крылова, при построении модели наблюдателя не применялась линеаризация матрицы D , определяющей ориентацию ГСК относительно АСК, что существенно уменьшает погрешность вычислений.

Численный эксперимент

Для иллюстрации возможности практического использования модели (10) в реальных ИНС было проведено численное моделирование движения НП на временном интервале 0 – 10000 с при шаге $\ll \text{Eqn095.wmf} \gg$ с при следующих выбранных начальных условиях:

$$m_0 = 0,702, \quad m_1 = 0,429, \quad m_2 = 0,172, \quad m_3 = 0,542.$$

Угловое движение ГСП моделировалось полиномом второго порядка (1), коэффициенты которого были выбраны в соответствии с достигнутым уровнем точного приборостроения и задавались следующими значениями:

$$R_x = 10^{-6} \text{ (м/с}^2\text{)}; R_y = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ (м/с}^2\text{)}; R_z = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ (м/с}^2\text{)}; U_x = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ (рад/с} \cdot \text{г)};$$

$$U_y = 0,8 \cdot 10^{-7} \text{ (рад/с} \cdot \text{г)}; U_z = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ (рад/с} \cdot \text{г)}; k_{xx} = 1,13 \cdot 10^{-8} \text{ (рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)}, k_{yy} = 1,25 \cdot 10^{-8}$$

$$\text{(рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)}, k_{zz} = 1,37 \cdot 10^{-8} \text{ (рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)}, k_{xy} = 1,15 \cdot 10^{-8} \text{ (рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)}, k_{yx} = 1,33 \cdot 10^{-8} \text{ (рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)},$$

$$k_{zx} = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ (рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)}, k_{xz} = 1,12 \cdot 10^{-8} \text{ (рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)}, k_{yz} = 1,35 \cdot 10^{-8} \text{ (рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)},$$

$$k_{zy} = 1,41 \cdot 10^{-8} \text{ (рад/с} \cdot \text{г}^2\text{)}.$$

Параметры вектора l были заданы для широты $\phi = \frac{\pi}{3}$. Для этой же точки были определены значения ускорения силы тяжести в АСК $g_L = 9,818$, $g_N = 7,35 \cdot 10^{-3}$, $g_E = -0,013$.

Коэффициенты передачи акселерометров определялись равными 1, переходные процессы – реальное время их 0,003 с. – не учитывались ввиду выбранной величины интервала съема измерений, равной h .

Анализ результатов моделирования показывает, что предложенный метод может найти эффективное применение в ИНС, функционирующих в течение длительного времени и не имеющих ограничений на углы прокатки. В качестве примера можно привести платформу *AIRS*. Также результаты исследования могут быть распространены на гиросtabilизаторы, имеющие четвертую рамку подвеса и широко используемые в настоящее время в ИНС различного типа подвижных объектов.

Полученная дифференциальная модель движения некорректируемой платформы (10) позволяет решить сразу целый комплекс практических задач:

- определить изменение во времени непосредственно углов ухода ГСП в ИСК при полиномиальной зависимости скорости ухода от ускорений;
- проанализировать параметрическую зависимость углов ухода ГСП от коэффициентов влияния на уход ускорений по осям ГСП;
- построить различные аппроксимирующие дифференциальные или функциональные временные зависимости углов ухода ГСП, позволяющие существенно сократить объем вычислительных затрат при калибровках и испытаниях платформы, стохастическом оценивании ее текущего состояния и т.п.

Построенная новая модель движения, позволяющая решить проблему контроля параметров железнодорожного пути, может найти широкое применение в современных автоматизированных средствах диагностики состояния железнодорожного полотна, обеспечивающих безопасность движения железнодорожного транспорта.

Список литературы

1. *Ишлинский А.Ю.* Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 672 с.
2. *Бранец В.Н., Шмыглевский И.П.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
3. *Ригли У., Денхард У., Холлистер У.* Теория, проектирование и испытание гироскопов. – М.: Мир, 1972. – 416 с.
4. *Соколов С.В., Половинчук Н.Я.* Теоретические основы синтеза автономных помехоустойчивых бесплатформенных навигационных систем: Монография. – МО РФ, 1998. – 340 с.
5. *Клодина Т.В., Погорелов В.А., Чуб Е.Г.* Инерциальные информационно-измерительные комплексы. Некорректируемая гиросtabilизируемая платформа. – Berlin: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 116 с.
6. *Погорелов В.А., Чуб Е.Г., Яковлев К.Ю.* Модель движения некорректируемой гиросtabilизированной платформы в параметрах Родрига-Гамильтона // Известия вузов. Авиационная техника. – 2012. – №3. – С. 69–72.

**SOLVING THE PROBLEM OF CHECKING THE PARAMETERS OF THE RAILWAY ON THE
BASIS OF USE INERTIAL TECHNOLOGIES**

Chub E.G.,

*Assistant of the department of higher mathematics,
e-mail: elenachub11@gmail.com,
Don State Technical University, Rostov-on-Don*

The article presents the first constructed stochastic model of the motion of a gyrostabilized platform that allows solving the problem of rail track parameters control based on the use of a high-precision inertial navigation system.

Keywords: inertial navigation system; gyrostabilized platform, Rodrig-Hamilton parameters