

Improvement of the mathematical description of the fuel spray swirl drift in a diesel combustion chamber volume / V. V. Pylyov // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 169 – 175. Bibliog.: 3 titles. – ISSN 2222-0631.

Improvement of the method of considering the cylinder charge swirl in the M. F. Rozleycey diesel working process model is proposed. The fuel spray front motion trajectories, the time of sprays reaching the combustion chamber wall and the points of these contacts are obtained with better precision.

Key words: internal combustion engine, diesel working process simulation, diesel combustion chamber, cylinder charge swirl, fuel spray propagation, trajectory deformation, spray and wall point of contact.

УДК 629.7.05

Ю.А. ПЛАКСІЙ, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

ТРЬОХЧАСТОТНІ АНАЛІТИЧНІ ЕТАЛОННІ МОДЕЛІ ОБЕРТАННЯ ТВЕРДОГО ТІЛА

Запропонована нова аналітична еталонна модель обертання твердого тіла, основана на тригонометричному мультиплікативному представленні кватерніона орієнтації. Показані можливості моделі для оцінювання точності алгоритмів визначення орієнтації в БІНС.

Ключові слова: кватерніон, орієнтація, еталонна модель, дрейф.

Вступ і постановка задачі. Розглядається задача оцінювання точності визначення орієнтації в безплатформених інерціальних навігаційних системах (БІНС) за допомогою спеціальних алгоритмів, орієнтованих на використання первинної інформації про обертання об'єкта на такті обчислень $[t_{n-1}, t_n]$ у вигляді *квазікоординат* [1]

$$\theta_{ni}^* = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i dt, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

де ω_i , $i = 1, 2, 3$ – проекції вектора абсолютної кутової швидкості об'єкта $\vec{\omega}$ на зв'язані осі. Оскільки алгоритми визначення орієнтації в БІНС відтворюють цифровий образ інерціального трієдра осей в бортовому обчислювачі, тобто відіграють роль *аналітичної платформи* [2], питання отримання коректних оцінок точності цих алгоритмів і визначення найбільш ефективного алгоритму для кожного конкретного рухомого об'єкту, що може здійснювати певні обертальні рухи, є актуальною задачею.

Для алгоритму визначення орієнтації, що має порядок m , математична похибка на такті $[t_{n-1}, t_n]$ становить величину $O(\theta_n^{*m+1})$, де θ_n^* – модуль век-

тора приросту позірного повороту $\bar{\theta}_n^* = (\theta_{n1}^*, \theta_{n2}^*, \theta_{n3}^*)^T$ на такті, компонентами якого є квазікоординати (1). Отримати аналітичний вираз для похибки $O(\theta_n^{*m+1})$ у випадку довільного обертання об'єкта, як твердого тіла, не представляється можливим.

Провести порівняльний аналіз фактичної точності алгоритмів визначення орієнтації одного математичного порядку можна тільки за допомогою спеціальних *еталонних моделей обертання*, які можуть бути дискретними або неперервними [4]. Звичайно у якості неперервних еталонних моделей використовують випадки існуючих точних розв'язків сукупності динамічних і кінематичних рівнянь обертання твердого тіла (*моделі кінцевого руху* [5, 6] та *регулярної прецесії* [7, 8]). У роботі [3] наведені аналітичні вирази для асимптотичних локальних похибок типу дрейфу та швидкості дрейфу деяких алгоритмів визначення орієнтації у випадку кінцевого обертання об'єкту. Отримані оцінки мають, насамперед, методологічне значення, але практична цінність їх для селекції алгоритмів визначення орієнтації у випадку довільного обертання об'єкта викликає певні сумніви. Проведений в [3] аналіз дозволив зробити висновок, що кінцевий рух не дозволяє виявити всі особливості похибок алгоритмів визначення орієнтації, тому кінцевий рух не може вважатися найгіршим випадком з точки зору точності методів. Раніше вважалося, що регулярна прецесія є найгіршим прикладом руху в сенсі поведінки похибок алгоритмів, але результати оцінювання алгоритмів на запропонованій в [9] новій неперервній еталонній моделі показують, що похибки алгоритмів типу дрейфу мають у випадку цієї моделі виражений зростаючий характер, в той час, як на моделі регулярної прецесії похибки цих алгоритмів типу дрейфу мають суто гармонічний характер.

Таким чином, використання моделей кінцевого руху та регулярної прецесії для оцінювання похибок і подальшої оптимізації алгоритмів визначення орієнтації не може вважатися цілком коректним, бо, по-перше, реальний рух об'єкта не завжди відповідає кінцевому руху або регулярній прецесії, по-друге, існує точний алгоритм визначення орієнтації в термінах квазікоординат у випадку регулярної прецесії [8].

Еталонна модель обертання твердого тіла цілком визначається прийнятими в ній аналітичними представленнями компонент *кватерніона орієнтації*

$$\Lambda(t) = (\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)^T \text{ в умовах } \|\Lambda(t)\| = 1.$$

Диференціюючи ці вирази і використовуючи *обернене кінематичне рівняння*, отримаємо аналітичні представлення для проєкцій вектора кутової швидкості у вигляді [9]:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 2(\dot{\lambda}_1 \lambda_0 - \dot{\lambda}_0 \lambda_1 + \lambda_3 \dot{\lambda}_2 - \lambda_2 \dot{\lambda}_3); \\ \omega_2 &= 2(\dot{\lambda}_2 \lambda_0 - \dot{\lambda}_0 \lambda_2 + \lambda_1 \dot{\lambda}_3 - \lambda_3 \dot{\lambda}_1); \\ \omega_3 &= 2(\dot{\lambda}_3 \lambda_0 - \dot{\lambda}_0 \lambda_3 + \lambda_2 \dot{\lambda}_1 - \lambda_1 \dot{\lambda}_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Квазікоординати (1) модельного руху при цьому визначаються також аналітично з формул:

$$\theta_{ni}^* = \theta_i(t_n) - \theta_i(t_{n-1}), \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

де $\theta_i(t)$, $i = 1, 2, 3$ – компоненти вектора позірнього повороту $\vec{\theta}(t) = \int_0^t \vec{\omega}(t) dt$.

В даній роботі пропонуються нові неперервні моделі обертання твердого тіла, основані на тригонометричному мультиплікативному представленні модельного кватерніона орієнтації у вигляді:

$$\lambda_0(t) = \cos(k_1 t) \cdot \cos(k_2 t); \quad \lambda_{j_1}(t) = \sin(k_1 t) \cdot \cos(k_2 t);$$

$$\lambda_{j_2}(t) = \sin(k_2 t) \cdot \cos(k_3 t + \beta_3); \quad \lambda_{j_3}(t) = \sin(k_2 t) \cdot \sin(k_3 t + \beta_3), \quad (4)$$

де k_1, k_2, k_3, β_3 – постійні параметри, а індекси j_1, j_2, j_3 компонент векторної частини кватерніона $\Lambda(t)$ утворюють деяку перестановку чисел (1, 2, 3).

Зауважимо, що вирази (4) узагальнюють представлення кватерніона еталонної моделі обертання, що наведена в [4]. Еталонні моделі обертання з представленням кватерніона орієнтації у вигляді (4) будемо називати *трьохчастотними* і позначати $EM_{j_1, j_2, j_3}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$. У відповідності до кількості всіх можливих перестановок в (4) будемо мати 6 трьохчастотних еталонних моделей орієнтації. При $\beta_3 = 0$ і основній перестановці індексів (1, 2, 3) в (4) будемо мати еталонну модель $EM_{1,2,3}(k_1; k_2; k_3; 0)$, яка описана в [4].

Трьохчастотні аналітичні еталонні моделі обертання твердого тіла.

Всі можливі еталонні моделі $EM_{j_1, j_2, j_3}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$, основані на представленні кватерніона орієнтації у вигляді (4), утворюють дві групи однотипних моделей. Першу групу однотипних моделей утворюють моделі з перестановками індексів j_1, j_2, j_3 , що мають парну кількість інверсій в перестановках відносно основної перестановки, тобто моделі

$$EM_{1,2,3}(k_1; k_2; k_3; \beta_3), \quad EM_{2,3,1}(k_1; k_2; k_3; \beta_3), \quad EM_{3,1,2}(k_1; k_2; k_3; \beta_3).$$

Для цієї групи моделей з (2) будемо мати наступні вирази для компонент вектора модельної кутової швидкості:

$$\omega_{j_1}(t) = (k_1 - k_3) + (k_1 + k_3) \cos(2k_2 t);$$

$$\omega_{j_2}(t) = 2k_2 \cos((k_1 - k_3)t - \beta_3) + (1/2)(k_1 + k_3)(\cos((2k_2 - k_1 + k_3)t + \beta_3) - \cos((2k_2 + k_1 - k_3)t - \beta_3));$$

$$\omega_{j_3}(t) = (1/2)(k_1 + k_3)(\sin((k_1 + 2k_2 - k_3)t - \beta_3) + \sin((2k_2 - k_1 + k_3)t + \beta_3)) - 2k_2 \sin((k_1 - k_3)t - \beta_3). \quad (5)$$

Компоненти вектора позірнього повороту $\vec{\theta}(t) = (\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t))^T$ при цьому визначаються формулами:

$$\begin{aligned}
\theta_{j_1}(t) &= (k_1 - k_3)t + (k_1 + k_3) \sin(2k_2 t) / (2k_2); \\
\theta_{j_2}(t) &= 2k_2 (\sin((k_1 - k_3)t - \beta_3) + \sin \beta_3) / (k_1 - k_3) + (1/2)(k_1 + k_3) \times \\
&\quad \times ((\sin((2k_2 - k_1 + k_3)t + \beta_3) - \sin \beta_3) / (2k_2 - k_1 + k_3) - \\
&\quad - (\sin((2k_2 + k_1 - k_3)t - \beta_3) + \sin \beta_3) / (2k_2 + k_1 - k_3)); \\
\theta_{j_3}(t) &= (-1/2)(k_1 + k_3) ((\cos((k_1 + 2k_2 - k_3)t - \beta_3) - \cos \beta_3) / (k_1 + 2k_2 - k_3) + \\
&\quad + (\cos((2k_2 - k_1 + k_3)t + \beta_3) - \cos \beta_3) / (2k_2 - k_1 + k_3)) + \\
&\quad + 2k_2 (\cos((k_1 - k_3)t - \beta_3) - \cos \beta_3) / (k_1 - k_3). \tag{6}
\end{aligned}$$

Якщо належним чином задати частоти k_1, k_2, k_3 і фазу β_3 в (4), то еталонна модель обертання $EM_{j_1, j_2, j_3}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$ представляється квазікоординатами (3), де компоненти вектора позірного повороту визначаються виразами (6), і відповідним до (3) точним кватерніоном орієнтації (4).

Другу групу однотипних моделей утворюють моделі з перестановками індексів s_1, s_2, s_3 в кватерніоні орієнтації (4) з непарною кількістю інверсій відносно основної перестановки (1, 2, 3), тобто моделі

$$EM_{1,3,2}(k_1; k_2; k_3; \beta_3), EM_{3,2,1}(k_1; k_2; k_3; \beta_3), EM_{2,1,3}(k_1; k_2; k_3; \beta_3).$$

Базовий кватерніон орієнтації для цієї групи моделей задається у вигляді

$$\begin{aligned}
\lambda_0(t) &= \cos(k_1 t) \cdot \cos(k_2 t); \quad \lambda_{s_1}(t) = \sin(k_1 t) \cdot \cos(k_2 t); \\
\lambda_{s_2}(t) &= \sin(k_2 t) \cdot \sin(k_3 t + \beta_3); \quad \lambda_{s_3}(t) = \sin(k_2 t) \cdot \cos(k_3 t + \beta_3). \tag{7}
\end{aligned}$$

Компоненти вектора модельної кутової швидкості у випадку кватерніона орієнтації (7) згідно (2) визначаються формулами

$$\begin{aligned}
\omega_{s_1}(t) &= (k_1 + k_3) + (k_1 - k_3) \cos(2k_2 t); \\
\omega_{s_2}(t) &= 2k_2 \sin((k_1 + k_3)t + \beta_3) + (1/2)(k_3 - k_1) \times \\
&\quad \times (\sin((2k_2 + k_1 + k_3)t + \beta_3) + \sin((2k_2 - k_1 - k_3)t - \beta_3)); \\
\omega_{s_3}(t) &= 2k_2 \cos((k_1 + k_3)t + \beta_3) + (1/2)(k_1 - k_3) \times \\
&\quad \times (\cos((2k_2 - k_1 - k_3)t - \beta_3) - \cos((2k_2 + k_1 + k_3)t + \beta_3)). \tag{8}
\end{aligned}$$

Інтегруючи вирази для $\omega_{s_i}(t)$ на інтервалі $[0, t]$, отримаємо для компонент вектора позірного повороту $\bar{\theta}(t)$ наступні вирази:

$$\begin{aligned}
\theta_{s_1}(t) &= (k_1 + k_3)t + (k_1 - k_3) \sin(2k_2 t) / (2k_2); \\
\theta_{s_2}(t) &= -2k_2 (\cos((k_1 + k_3)t + \beta_3) - \cos \beta_3) / (k_1 + k_3) - (1/2)(k_3 - k_1) \times \\
&\quad \times ((\cos((2k_2 + k_1 + k_3)t + \beta_3) - \cos \beta_3) / (2k_2 + k_1 + k_3) + \\
&\quad + (\cos((2k_2 - k_1 - k_3)t - \beta_3) - \cos \beta_3) / (2k_2 - k_1 - k_3)); \\
\theta_{s_3}(t) &= 2k_2 (\sin((k_1 + k_3)t + \beta_3) - \sin \beta_3) / (k_1 + k_3) + (1/2)(k_1 - k_3) \times \\
&\quad \times ((\sin((2k_2 - k_1 - k_3)t - \beta_3) - \sin \beta_3) / (2k_2 - k_1 - k_3) - \\
&\quad - (\sin((2k_2 + k_1 + k_3)t + \beta_3) - \sin \beta_3) / (2k_2 + k_1 + k_3)). \tag{9}
\end{aligned}$$

Еталонна модель другої групи $EM_{s_1, s_2, s_3}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$ реалізується формулами (3), (9) для квазікоординат і виразами для компонент модельного кватерніону орієнтації (7), якщо попередньо задати частоти k_1, k_2, k_3 і фазу β_3 .

Оскільки при побудові запропонованих еталонних моделей обертання були також отримані і представлення для компонент вектора модельної кутової швидкості, то ці моделі можна використовувати і у випадку первинної інформації про обертання у вигляді проекцій ω_i , $i = 1, 2, 3$ вектора абсолютної кутової швидкості твердого тіла на зв'язані осі в моменти часу t_n , $n = 1, 2, 3, \dots$.

Приклади конкретної реалізації моделі. Побудуємо еталонну модель обертання $EM_{1,2,3}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$, що належить до першої групи однотипних моделей, для деяких наборів частот k_1, k_2, k_3 і фази β_3 .

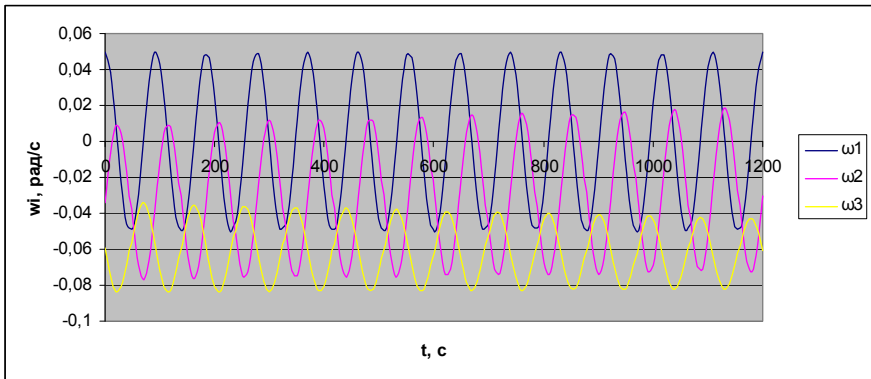


Рис. 1 – проекції вектора кутової швидкості моделі $EM_{1,2,3}(0,025; -0,034; 0,0251; \pi/3)$.

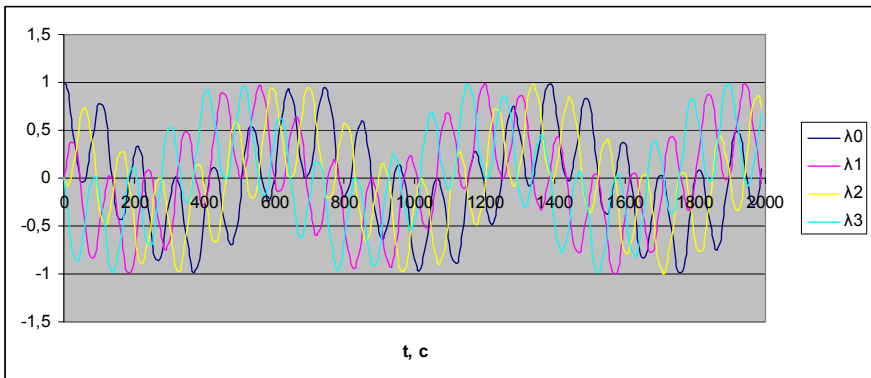


Рис. 2 – компоненти кватерніона орієнтації моделі $E_{1,2,3}(0,025; -0,034; 0,0251; \pi/3)$.

На рис. 1 представлені залежності проекцій вектора кутової швидкості модельного руху від часу при $k_1 = 0,025$, $k_2 = -0,034$, $k_3 = 0,0251$ і

$\beta_3 = \pi/3$. Відповідні залежності від часу компонент кватерніона орієнтації моделі наведені на рис. 2.

На рис. 3 представлені залежності проекцій вектора кутової швидкості від часу для моделі $EM_{1,2,3}(0,005; 0,140; 0,024; \pi/3)$. Компоненти модельного кватерніона орієнтації наведені на рис. 4.

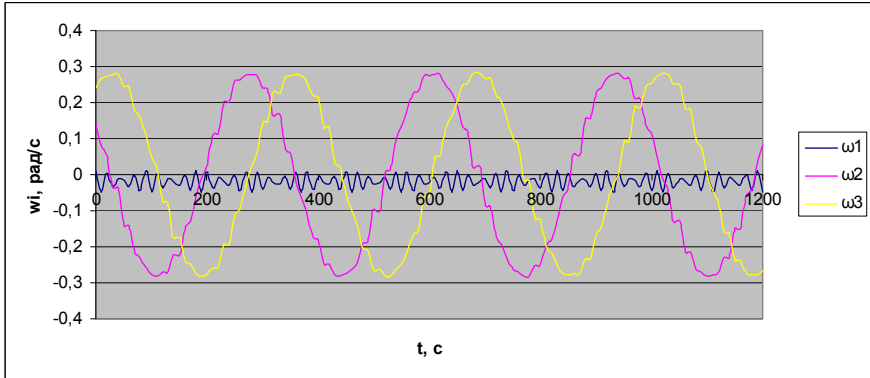


Рис. 3 – проекції вектора кутової швидкості моделі $EM_{1,2,3}(0,005; 0,140; 0,024; \pi/3)$.

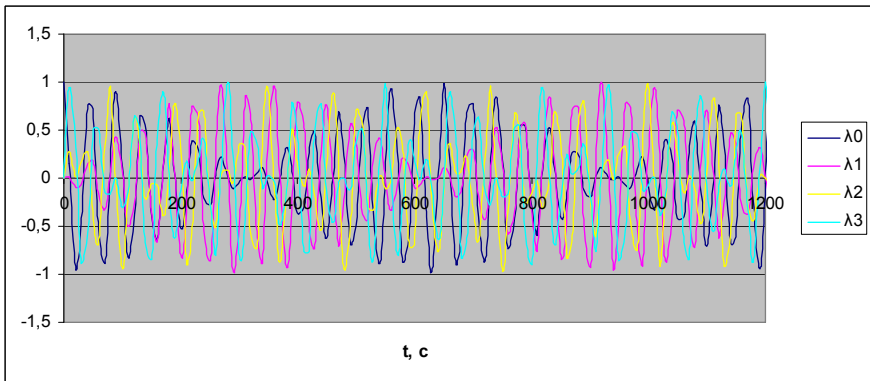


Рис. 4 – компоненти кватерніона орієнтації моделі $EM_{1,2,3}(0,005; 0,140; 0,024; \pi/3)$.

Розглянемо тепер еталонну модель другої групи однотипних моделей, а саме модель $EM_{1,3,2}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$. Побудуємо цю модель для деяких значень частот k_1, k_2, k_3 і фази β_3 . На рис. 5 показані залежності від часу проекцій вектора модельної кутової швидкості при $k_1 = 0,0152$, $k_2 = 0,025$, $k_3 = 0,0151$ і $\beta_3 = \pi/4$. Кватерніон орієнтації для цієї моделі представлено на рис.6. За характером поведінки проекцій кутової швидкості і компонент

кватерніона орієнтації можна зробити висновок, що при вказаних значеннях параметрів модель $EM_{1,3,2}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$ близька до регулярної прецесії. Компоненти кутової швидкості і кватерніона орієнтації моделі $EM_{1,3,2}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$ при $k_1 = -0,045$, $k_2 = 0,0345$, $k_3 = 0,025$, $\beta_3 = \pi/2$ представлені на рис. 7 і рис. 8; вони описують обертальний рух, який більш складний, ніж регулярна прецесія.

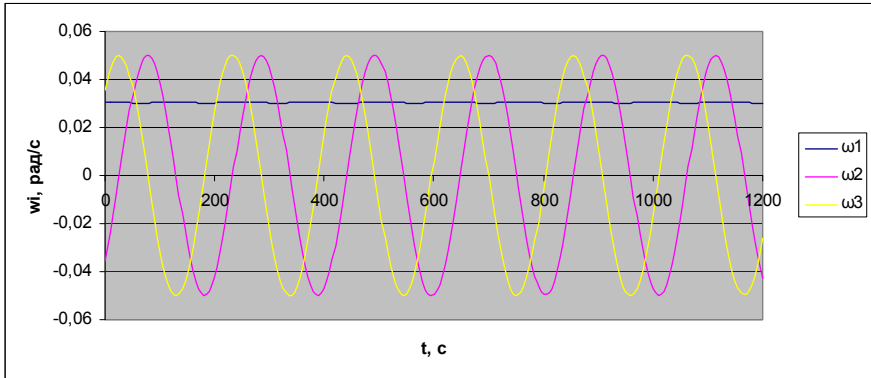


Рис. 5 – проєкції вектора кутової швидкості моделі $EM_{1,3,2}(0,0152; 0,025; 0,0151; \pi/4)$.

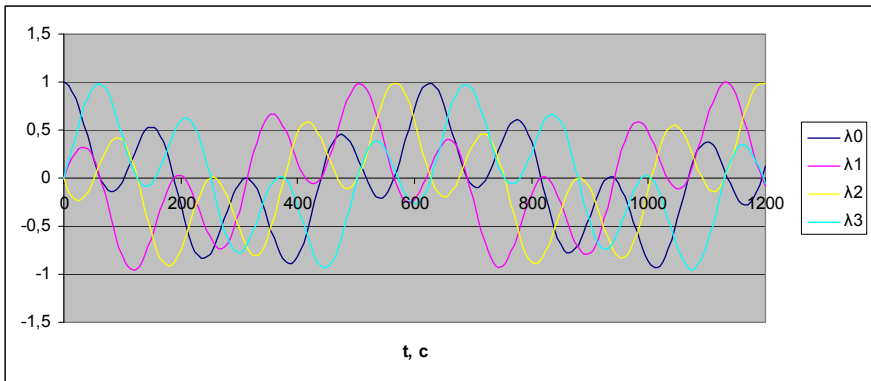


Рис. 6 – компоненти кватерніона орієнтації моделі $EM_{1,3,2}(0,0152; 0,025; 0,0151; \pi/4)$.

Аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що запропонована трьохчастотна еталонна модель обертання, основана на тригонометричному мультиплікативному представленні кватерніона орієнтації, охоплює достатньо широкий спектр рухів об'єкта як твердого тіла.

Застосування трьохчастотних еталонних моделей для оцінювання

похибок алгоритмів визначення орієнтації. Проведемо оцінювання похибки типу дрейфу для алгоритму визначення орієнтації четвертого порядку, наведеного в [10]. На рис. 9 – 10 показані отримані в результаті чисельного експерименту залежності похибки типу дрейфу від часу для такту обчислень $\Delta t = 0,1$ с у випадку моделі першої групи $EM_{1,2,3}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$, реалізованої при двох наборах параметрів k_1, k_2, k_3, β_3 . Як видно з рис. 10, для значень

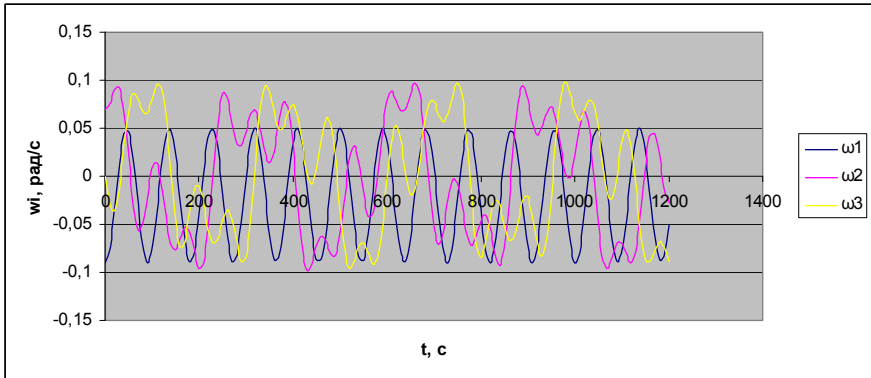


Рис. 7 – проекції вектора кутової швидкості моделі $EM_{1,3,2}(-0,045; 0,0345; 0,025; \pi/2)$.

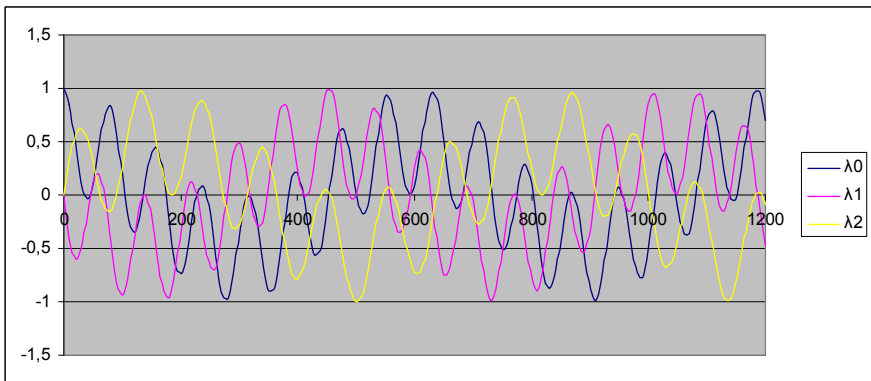


Рис. 8 – компоненти кватерніона орієнтації моделі $EM_{1,3,2}(-0,045; 0,0345; 0,025; \pi/2)$.

параметрів моделі $k_1 = 0,005, k_2 = 0,140, k_3 = 0,024$ і $\beta_3 = \pi/3$ похибка алгоритму зростає з часом. На рис. 11 – 12 наведені похибки типу дрейфу, отримані на моделі $EM_{1,3,2}(k_1; k_2; k_3; \beta_3)$, що відноситься до другої групи моделей. З'ясовано, що характер поведінки похибки алгоритму на цій моделі при різних наборах параметрів має теж різний характер. Так, при значеннях

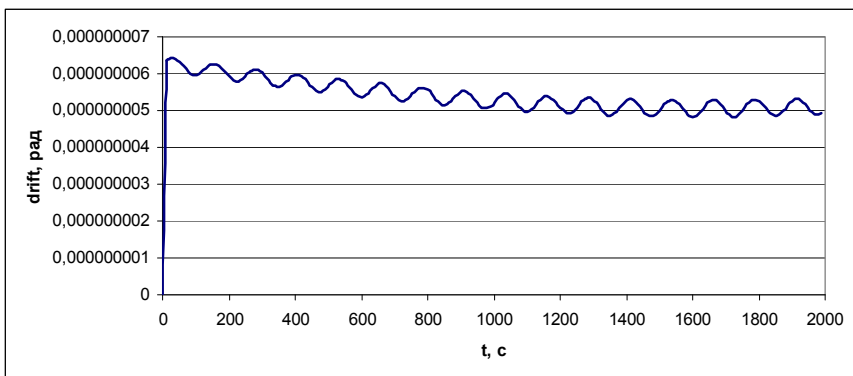


Рис. 9 – похибка типу дрейфу на моделі $EM_{1,2,3}(0,025; -0,034; 0,0251; \pi/3)$.

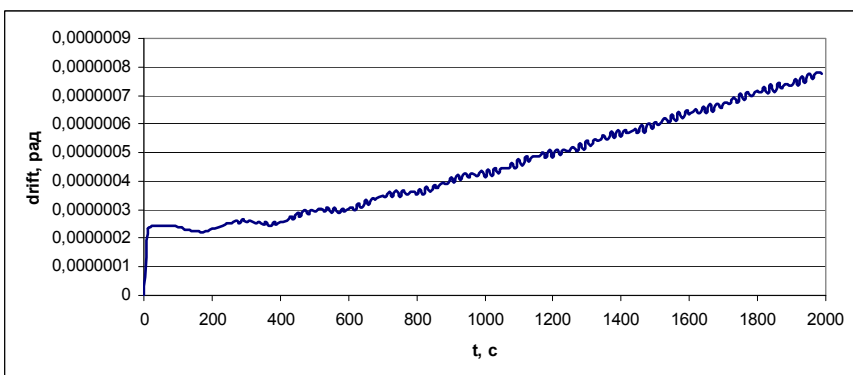


Рис. 10 – похибка типу дрейфу на моделі $EM_{1,2,3}(0,005; 0,140; 0,024; \pi/3)$.

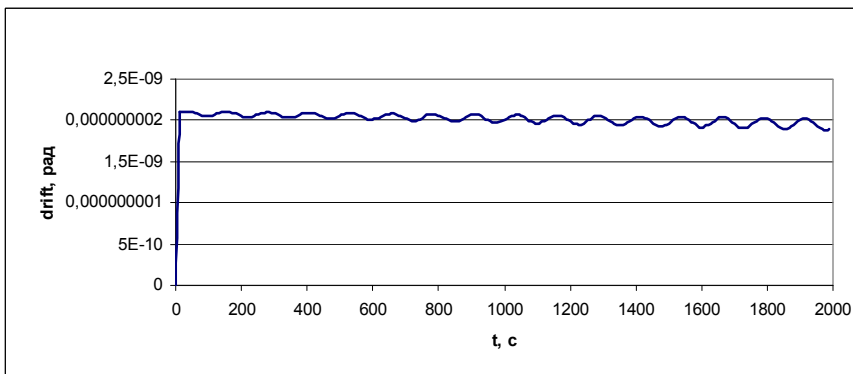


Рис. 11 – похибка типу дрейфу на моделі $EM_{1,3,2}(0,0152; 0,025; 0,0151; \pi/4)$.

параметрів $k_1 = -0,045$, $k_2 = 0,0345$, $k_3 = 0,025$, $\beta_3 = \pi/2$ похибка визначення орієнтації типу дрейфу для цього алгоритму має явно виражену зростаючу складову. Отже, при оцінюванні алгоритмів визначення орієнтації «найгіршими» (з точки зору похибок алгоритмів) еталонними моделями з розглянутих можна вважати моделі $EM_{1,2,3}(0,005; 0,140; 0,024; \pi/3)$ і $EM_{1,3,2}(-0,045; 0,0345; 0,025; \pi/2)$.

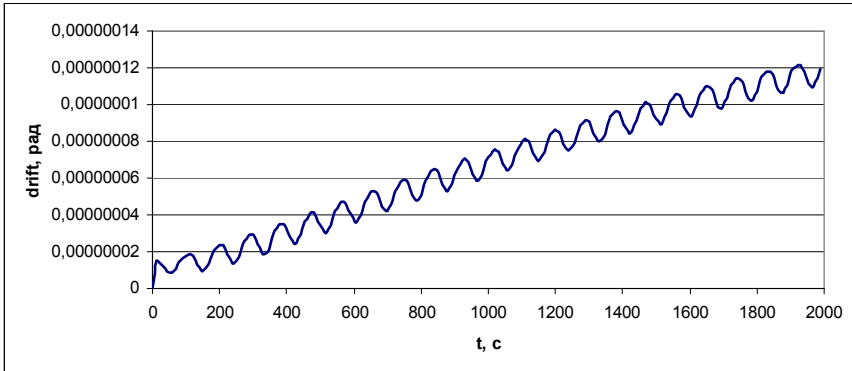


Рис. 12 – похибка типу дрейфу на моделі $EM_{1,3,2}(-0,045; 0,0345; 0,025; \pi/2)$.

Висновки. Запропоновані нові аналітичні трьохчастотні еталонні моделі обертання твердого тіла, в основі яких лежить тригонометричне мультиплікативне представлення кватерніона орієнтації. Показано, що за допомогою цих моделей при належному виборі параметрів можна отримати достатньо широкий набір рухів об'єкта як твердого тіла. Для відомого алгоритму четвертого порядку на запропонованих еталонних моделях при різних значеннях параметрів отримані оцінки похибки визначення орієнтації типу дрейфу. Показано, що на різних моделях похибки мають різний характер, причому моделі, близькі до регулярної прецесії, не дозволяють в повній мірі провести аналіз похибок.

Список літератури: 1. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – М.: Наука, 1992. – 280 с. 2. Mortensen R.E. Strapdown Guidance Error Analysis. – IEEE Trans. Aerospace and Electr. Syst., 1974, vol.10, No 4, pp. 451 – 458. 3. Панов А.П. Асимптотические оценки погрешностей методов вычислений параметров ориентации твердого тела // Кибернетика и вычисл. техника. – 1980. – Вып.47. – С. 59 – 71. 4. Кузнецов Ю.А., Олейник С.В., Деменков В.А., Плаксий Ю.А. Применение моделей вращения для анализа погрешностей алгоритмов бесплатформенных инерциальных систем ориентации подвижных объектов // Труды XII Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. – С.-Петербург: ЦНИИ “Электронприбор”. – 2010. – С. 114 – 116. 5. Ткаченко А.И. О применении параметров Родрига-Гамильтона в алгоритмах определения ориентации объекта // Кибернет. и вычисл. техн. – К., 1970. – Вып. 5. – С. 20 – 22. 6. Панов А.П. Оптимизация методов вычисления кватернионов при конических колебаниях твердого тела// Механика гироскоп. систем. – К., 1984. – Вып. 3. – С. 105 – 112. 7. Панов А.П. Оптимизация высокоточных алгоритмов вычисления кватернионов в случае прецессии твердого тела // Кибернет. и вычисл. техн. – К., 1987. – Вып. 73. – С. 3 – 9. 8. Плаксий Ю.А. Аналитические оценки точности алгорит-

мов определения ориентации в кватернионах для случая регулярной прецессии объекта // Вестник Харьк. политехн. ин-та, №2. – 1992, вып. 11. – С.79 – 83. **9. Плаксі́й Ю.А.** Еталонна тригонометрична кватерніонна модель обертання прецесійного типу твердого тіла // Вісник НТУ «ХПІ», випуск 37'2013. – Математичне моделювання в техніці та технологіях. – С. 141 – 147. **10. Бранець В.Н., Шмыглевский И.П.** Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. – М.: Наука, 1973. – 320 с.

Надійшла до редколегії 16.01.2014

УДК 629.7.05

Трьохчастотні аналітичні еталонні моделі обертання твердого тіла / Ю. А. Плаксі́й // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 6 (1049). – С. 175 – 185. Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2222-0631.

Предложена новая аналитическая эталонная модель вращения твердого тела, основанная на тригонометрическом мультипликативном представлении кватерниона ориентации. Показаны возможности модели для оценивания точности алгоритмов определения ориентации в БИНС.

Ключевые слова: кватернион, ориентация, эталонная модель, дрейф.

UDC 629.7.05

Three-frequency analytical reference model of a rigid body rotation. / Yu. A. Plaksiy // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 175 – 185. Bibliog.: 10 titles. – ISSN 2222-0631.

A new analytical reference model of a rigid body rotation based on the trigonometric multiplicative representation of the orientation quaternion is suggested. The resources of the model for error analysis of orientation algorithms in strapdown inertial navigation systems are demonstrated.

Key words: quaternion, orientation, reference model, drift.

УДК 621.9

М.С. СТЕПАНОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

М.І. ГАСАНОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;

І.В. ВОЛОШКІНА, інж., НТУ «ХПІ»

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ ОХОЛОДЖЕННЯ ШЛІФУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ

Наведено математичну модель для розрахунку температури мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) у підсистемі використання. Температура визначається в залежності від етапу циклу шліфування. Модель побудована на основі рівняння зміни температури при проходженні рідини крізь місцевий опір.

Ключові слова: мастильно-охолоджувальна рідина, температура, підсистема використання МОР, теплові потоки.

Вступ. Ефективність використання мастильно-охолоджувальних рідин (МОР) при шліфуванні визначається не тільки оптимальним складом, але і