

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Навчально - науковий інститут транспорту і будівництва
Кафедра логістичного управління та безпеки руху на транспорті**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної випускної роботи**


освітній ступінь - магістр
спеціальність - 273 – «Залізничний транспорт»
спеціалізація «Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті»

на тему: «ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ ПОЛІПШЕННЯМ
ХАРАКТЕРИСТИК ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ»


Виконав
Здобувач вищої освіти
групи ІБЗТ-19зм


(підпис) Островський Л.В.


Керівник:


(підпис) ст.викл. Мірошникова М.В.

Завідувач кафедри:


(підпис) проф. Чернецька-Білецька Н.Б.

Рецензент:


(підпис) Роїсак Є.В.
(підпис і прізвище)

Сверодонецьк – 2021

1. ДИНАМІЧНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЕКІПАЖІВ НА ОСНОВІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

У післявоєнні роки в перебігу періоду в кілька десятиліть в Дніпропетровську зусиллями видатних вчених і конструкторів М.К. Янгеля, В.А. Лазаряна, В.С. Будника та інших був створений потужний науково-технічний потенціал здатний вирішувати складні завдання транспортних систем різного призначення: ракет-носіїв, космічних апаратів, високошвидкісного наземного транспорту (ВСНТ) [41, 73, 76]. Силами наукових шкіл по динаміці і управління рухом, керованих Н.Ф. Герасюти, Е.П. Блохіним і іншими розроблялися оригінальні методи досліджень транспортних систем на основі натурального і обчислювального експерименту [11, 34, 77, 87, 90]. При цьому велика увага приділялася організації та проведенню математичного моделювання динаміки, стійкості, керованості рухом [91, 92].

1.1. Постановка задач динаміки транспортних екіпажів

При розробці математичних моделей використовуються різні методи механіки і математичний апарат [5, 16, 17, 24, 31, 44, 45, 66-70, 78-80]. Зокрема, при описі поступального і обертального руху твердого тіла використовується глибока, далеко що йде аналогія між відповідними диференціальними рівняннями. Ці рівняння символічно можуть бути представлені у вигляді [43]

$$\dot{\vec{A}} = \vec{B} \quad (1.1)$$

де в разі поступального руху вектор $\dot{\vec{A}}$ — кількість руху твердого тіла, вектор \vec{B} — сума всіх діючих на це тіло зовнішніх сил, а в разі обертального руху вектор $\dot{\vec{A}}$ — вектор моменту кількості руху твердого тіла, вектор \vec{B} — момент всіх діючих на тіло зовнішніх сил.

При побудові математичних моделей динаміки залізничних екіпажів наукова школа, очолювана академіком В.А. Лазаряном, широко використовує

рівняння Лагранжа другого роду в узагальнених координатах [73-76]. Подальший розвиток цього наукового напрямку пов'язане з пошуком доцільною форми подання математичних моделей адаптованих до сучасної обчислювальної техніки. Для цієї мети використовуються диференціальні рівняння руху в формі Ейлера-Лагранжа [31, 57, 82, 101], які в значній мірі полегшують процес побудови математичних моделей і дозволяють отримати симетричну і більш просту структуру моделі в порівнянні з моделлю, отриманою за допомогою рівнянь Лагранжа або Ньютона [84]. Схематично нелінійні рівняння руху вільного твердого тіла в просторі у формі Ейлера-Лагранжа записуються у вигляді:

$$\varepsilon_i(T) = \sum_k \left\| \frac{\bar{M}_{yi}^k}{\bar{Q}_{yi}^k} \right\|, \quad (1.2)$$

де $\varepsilon_i(T)$ – ейлерів оператор, $\bar{M}_{yi}^k, \bar{Q}_{yi}^k$ – приведені до масі m_i узагальнені моменти і сили, прикладені до i -му твердого тіла. У цих рівняннях в якості змінних інтегрування приймаються квазіскорості. Матричні складові узагальнених сил в рівняннях руху Ейлера-Лагранжа визначаються відомим методом [84] як множники при варіаціях квазікоординат в вираженні елементарної роботи. Наведені рівняння Ейлера-Лагранжа покладені в основу математичних моделей, що використовуються в обчислювальних експериментах в процесі динамічного проектування складних транспортних систем. При цьому можуть бути розглянуті дві постановки задачі:

- традиційна, основне завдання механіки руху, широко використовується стосовно до літальних апаратів [4, 17, 36, 58, 77],
- зворотна задача механіки руху, доцільність вирішення якої стосовно швидкісним екіпажам залізничного транспорту обґрунтовується в роботі [59-65, 94].

Традиційна постановка задач динамічного проектування літальних апаратів зводиться до наступного: задані характеристики літального апарату, система сил і моментів впливають на об'єкт включаючи керуючі; знаходяться кінематичні параметри руху, зокрема, траєкторія польоту. Відзначимо тут, що керуючі сили і моменти формуються за допомогою, так званої, інерційної вимірювальної системи [15, 44, 46, 98, 118].

Зворотні задачі динамічного проектування природно і логічно формулюються для швидкісних екіпажів залізничного транспорту і їх узагальнена постановка зводиться до наступного: задана траєкторія руху - реальний залізничну колію, що має кривизну в плані і профілі, локальні нерівності і т.п., зовнішні впливи, інерційні і геометричні параметри екіпажу; знаходиться динамічна навантаженість шляху, елементів конструкції, відповідна заданим режимом руху швидкісного екіпажу щодо реального залізничній колії. Тут годиться, що кінематичні параметри руху і, зокрема, траєкторія руху відстежується за допомогою інерціальної вимірювальної системи тієї чи іншої відомої схеми [43].

1.2. Базова динамічна модель екіпажу швидкісного транспорту

Базова динамічна модель екіпажу швидкісного транспорту являє собою суперелементов у вигляді асиметричного твердого тіла характеризується інерційними параметрами: масою, моментом інерції, розташуванням центру мас, геометрією просторової форми, що визначає центр тиску поверхневих сил, конструктивними параметрами, активними, пасивними силами і моментами, які формувались за відомим алгоритмам залежно від умов поставленого завдання. Наприклад, керуючі сили і моменти формуються традиційним способом - шляхом відхилення вектора сили тяги щодо центру мас в залежності від вимірюваних інерційної вимірювальною системою кінематичних параметрів руху, або зворотним способом - шляхом зміщення центру мас екіпажу щодо стежить сили [41, 56]. Для управління також широко використовуються різноманітні схеми аеродинамічних поверхонь [72], наприклад, керма курсу розташовані на хвостовому оперенні, елерони, розміщені на горизонтальному оперенні [97]. Вводиться при необхідності реакція опори на корпус екіпажу швидкісного транспорту у вигляді вектора моменту і сили [99] наведеної, наприклад, до базового ТРИЕДР бесплатформенной інерційної вимірювальної системи.

1.3. Математична модель нелінійної динаміки в просторі базової схеми швидкісного екіпажу

Вимірювані безплатформенної інерційної вимірювальною системою проекції вектора лінійної швидкості полюса базового ТРІЕДР - V_{i0y} ($i=1, 2, 3$) і вектора кутової швидкості екіпажу на пов'язані осі - ω_{iy} ($i=1, 2, 3$) приймаються в якості змінних - квазіскоростей. Тоді, як показав А.І. Лур'є [84], нелінійні диференціальні рівняння руху асиметричного твердого тіла в просторі доцільно представляти у формі рівнянь Ейлера-Лагранжа. Застосування математичного апарату кватерніони матриць [66-68] дозволяє надати цим рівнянням руху необхідну симетрію і компактність. До математичного опису завдання динаміки пред'являються такі специфічні вимоги як зручність програмування, можливість верифікації алгоритму, ефективність обчислювального процесу. Ці вимоги вдається значною мірою задовольнити, застосовуючи обчислення кватерніони матриць, метод блочного побудови моделей динаміки транспортного екіпажу, диференціальні рівняння руху в формі Ейлера-Лагранжа [101].

Нелінійна динаміка асиметричного твердого тіла, прийнятого в якості суперелементов, описується отриманими рівняннями руху Ейлера-Лагранжа:

$$\begin{aligned} & \left\| \frac{\bar{I}_y}{\frac{1}{2}(Y_c^t + {}^t Y_c^t)} \middle| \frac{\frac{1}{2}({}^t Y_c + Y_c)}{E_0} \right\| \left\| \frac{\dot{\omega}_y}{\dot{V}_{0y}} \right\| + \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t \Omega_y + \Omega_y)}{0} \middle| \frac{\frac{1}{2}({}^t V_y + V_y)}{\frac{1}{2}({}^t \Omega_y + \Omega_y)} \right\| \times \\ & \times \left\| \frac{\bar{I}_y}{\frac{1}{2}(Y_c^t + {}^t Y_c^t)} \middle| \frac{\frac{1}{2}({}^t Y_c + Y_c)}{E_0} \right\| \left\| \frac{\omega_y}{V_{oy}} \right\| = \frac{1}{m} \left\| \frac{M_y}{Q_y} \right\|; \end{aligned} \quad (1.3)$$

і кінематичними співвідношеннями:

$$\dot{a} = \frac{1}{2} {}^t A \times \omega_y, \quad \dot{z} = A \times {}^t A \times V_{oy}, \quad (1.4)$$

представленими симетричною блокової матричної записом за допомогою системи кватерніони матриць: $\Omega_y, {}^t \Omega_y, V_y, {}^t V_y, Y_c, {}^t Y_c, Y_c^t, {}^t Y_c^t, A, {}^t A, A^t, {}^t A^t$. Тут m - маса

асиметричного твердого тіла, \bar{I}_y - матриця інерції в пов'язаних осях, наведена до маси, E_0 - одинична матриця (4x4), 0 - нуль-матриця (4x4). Відзначимо, що кватерніонами матриці $A, {}^tA, {}^tA', A'$ в розгорнутої записи мають наступну впорядковану структуру [67, 68]:

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ -a_1 & a_0 & -a_3 & a_2 \\ -a_2 & a_3 & a_0 & -a_1 \\ -a_3 & -a_2 & a_1 & a_0 \end{pmatrix}; \quad {}^tA = \begin{pmatrix} a_0 - a_1 - a_2 - a_3 \\ a_1 & a_0 - a_3 & a_2 \\ a_2 & a_3 & a_0 - a_1 \\ a_3 - a_2 & a_1 & a_0 \end{pmatrix};$$

$${}^tA' = \begin{pmatrix} a_0 - a_1 - a_2 - a_3 \\ a_1 & a_0 & a_3 & -a_2 \\ a_2 - a_3 & a_0 & a_1 \\ a_3 & a_2 - a_1 & a_0 \end{pmatrix}; \quad A' = \begin{pmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ -a_1 & a_0 & a_3 & -a_2 \\ -a_2 & -a_3 & a_0 & a_1 \\ -a_3 & a_2 & -a_1 & a_0 \end{pmatrix}.$$

Блочно-матричні диференціальні рівняння руху складено відносно шести квазіскоростей $\omega_{iy} (i = 1, 2, 3)$, $V_{i0y} (i = 1, 2, 3)$, Трьох просторових координат полюса $z_i (i = 1, 2, 3)$ і чотирьох параметрів Родріга-Гамільтона $a_j (j = 1, 2, 3)$. Ці рівняння безпосередньо приведені до форми Коші, для якої є ефективні стандартні програми інтегрування.

Залежно від складу сил, що впливають на транспортний екіпаж, формується права частина диференціальних рівнянь руху Ейлера-Лагранжа у вигляді суми блокових матриць. Вплив сили ваги (g - прискорення сили тяжіння) на динаміку екіпажу залежить від орієнтації пов'язаних осей $OY_1Y_2Y_3$ щодо інерційних $OZ_1Z_2Z_3$, Однозначно визначається параметрами Родріга-Гамільтона $a_j (j = 0,1,2,3)$, Розташування центру мас, заданого в пов'язаних осях координатами $y_{ic} (i = 1,2,3)$. Вважаючи, що сила ваги спрямована протилежно осі OZ_2 , Отримаємо відповідну цій силі блочну матрицю у вигляді:

$$g \begin{pmatrix} \frac{Y_c + {}^tY_c}{2} \\ E_0 \end{pmatrix} A^t \times {}^tA' \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (1.5)$$

Далі аеродинамічні (поверхневі) сили і моменти, що впливають на

підконструкцію з боку оточуючої середовища, наведені до деякої обраної точки d в зв'язаній системі координат $O_d X_1 X_2 X_3$, Представимо у вигляді:

$$Q_{xd} = qS \begin{Bmatrix} 0 \\ c_{1d} \\ c_{2d} \\ c_{3d} \end{Bmatrix}; M_{xd} = qSl \begin{Bmatrix} 0 \\ m_{1d} \\ m_{2d} \\ m_{3d} \end{Bmatrix}, \quad (1.6)$$

де c_{id} ($i=1,2,3$) – аеродинамічні коефіцієнти поперечної, нормальної і поздовжньої сил, m_{id} ($i=1,2,3$) – аеродинамічні коефіцієнти моментів тангажа, рискання і крену, що визначаються згідно з методами теоретичної і експериментальної аеродинаміки [72,97], S, l – площа миделя і характерний лінійний розмір, q – швидкісний тиск.

Система координат $O_d X_1 X_2 X_3$ зв'язується з геометричними осями симетрії підконструкції, а площину $O_d X_2 X_3$ вибирається в якості поздовжньої площини симетрії. Орієнтацію геометричних осей $O_d X_1 X_2 X_3$ щодо пов'язаних $O Y_1 Y_2 Y_3$ визначають задані параметри Родріга-Гамільтона r_{jd} ($j=1,2,3$), А положення точки приведення поверхневих сил O_d – координати y_{id} ($i=1,2,3$). Вплив аеродинамічних сил і моментів на динаміку екіпажу описується в рівняннях руху блокової матрицею виду:

$$\frac{qS}{m} \begin{Bmatrix} Y_d + Y_d \\ 2 \\ \dots \\ E_0 \end{Bmatrix} R_d \times R_d \begin{Bmatrix} 0 \\ c_{1d} \\ c_{2d} \\ c_{3d} \end{Bmatrix} + l \begin{Bmatrix} E_0 \\ \dots \\ 0 \end{Bmatrix} R_d \times R_d \begin{Bmatrix} 0 \\ m_{1d} \\ m_{2d} \\ m_{3d} \end{Bmatrix}. \quad (1.7)$$

Тут кватерніонами матриці Y_d, R_d складені по координатам y_{id} і параметрам Родріга-Гамільтона r_{jd} . При визначенні величин аеродинамічних сил і моментів в процесі руху твердого тіла виникає необхідність обчислення ряду кінематичних параметрів. наприклад, V_α – швидкості потоку, що набігає, α_a, β_a – кутів атаки і ковзання, h – висоти руху над поверхнею, ω – кутової швидкості і т.п. швидкість

полюса u_{0y} , щодо навколишнього середовища в системі осей $OY_1Y_2Y_3$ знаходиться у вигляді:

$$u_{0y} = R^t \times^t R^t (\dot{z}_0 - w), \quad (1.8)$$

де $w_i (i=1,2,3)$ – проекції швидкості вітру в інерціальній системі координат $OZ_1Z_2Z_3$.

У загальному випадку точка приведення поверхневих сил O_d і початок пов'язаної системи координат не збігаються, тобто $Y_d \neq 0$. Тоді проекції вектора місцевої швидкості цієї точки щодо навколишнього середовища доповнюється складовими, зумовленими просторовим обертанням підконструкції

$$u_{dy} = R^t \times^t R^t (\dot{z} - w) + \frac{1}{2} (\Omega_y + {}^t\Omega_y) y_d \quad (1.9) \text{ або } u_{dy} = V_{0y} - R^t \times^t R^t \times w + \frac{1}{2} (Y_d^t + {}^tY_d^t) \omega_y \quad (1.10)$$

Далі, вважаючи, що геометричні і пов'язані осі не паралельні, тобто $R_d \neq 0$, Знаходяться проекції вектора місцевої швидкості точки O_d в системі координат $O_dX_1X_2X_3$:

$$u_{dx} = R_d^t \times {}^tR_d^t \times u_{dy}. \quad (1.11)$$

використовуючи проекції u_{idx} , Легко знаходяться місцеві кути атаки і ковзання. Сили, що виникають при обтіканні плоского оперення (стабілізатор, дефлектор), наводяться до точки O_s в системі координат $O_sX_1X_2X_3$. Осі координат розташовуються щодо плоского оперення наступним чином: вісь O_sX_3 – за середньою хорді назустріч набігаючого потоку, вісь O_sX_1 – перпендикулярно площині оперення, вісь O_sX_2 – до кінцевої хорді. Положення оперення щодо підконструкції визначається координатами точки приведення $Y_{is} (i=1,2,3)$, Кутом повороту φ і укосу δ . Цим кутам відповідають параметри Родріга-Гамільтона:

$$\begin{aligned} a_{0s} &= \cos \frac{\varphi}{2}, & a_{1s} &= 0, & a_{2s} &= 0, & a_{3s} &= \sin \frac{\varphi}{2}, \\ b_{0s} &= \cos \frac{\delta}{2}, & b_{1s} &= \sin \frac{\delta}{2}, & b_{2s} &= 0, & b_{3s} &= 0, \end{aligned} \quad (1.12)$$

що визначають орієнтацію введеної системи координат щодо пов'язаної з підконструкцією.

Структура блокових матриць, які враховують в рівняннях руху подконструкції вплив оперення, ідентична структурі отриманих вище блокових матриць, що описують аеродинамічні сили і моменти. Причому функція-сигнатура $sign u_{15x}$ визначає напрямком компонент аеродинамічної сили.

На основі складених укрупнених блоків матриць, що описують динаміку і кінематику твердого тіла, вплив різноманітних активних сил і моментів, інерційні характеристики та інші допоміжні співвідношення, вдається формувати складні математичні моделі просторового руху, відповідні блоковим динамічним схемами розглянутого транспортного екіпажу.

1.4. Приклад розробки зразка високошвидкісного екіпажу

Очевидним є факт, що в даний час діапазон швидкостей 150 - 600 км / ч, сполучний наземний і повітряний транспорт, недостатньо освоєний. Провідні країни світу активно проводять науково-технічні роботи по створенню нових видів транспортних засобів, які за своїми техніко-економічним і експлуатаційними характеристиками заповнили б зазначений інтервал швидкостей [48]. Зокрема, такі фірми як Vehicle Research Corp., General Dynamic, Kawasaki, Lockheed бачать вирішення поставленої проблеми в розробці проектів різних екранопланів. Пріоритет в області екранопланостроєння належить Центральному конструкторському бюро по судах на підводних крилах імені Р. Алексєєва, де були закладені науково-методичні основи проектування екранопланів. Над вирішенням проблем аеродинаміки, міцності, безпеки та експлуатаційної надійності екранопланів працювали вчені галузевих суднобудівних і авіаційних НДІ, в тому числі ЦНДІ ім. А.Н. Крилова, ЦАГІ, ЛП. Були створені зразки екранопланів не мають аналогів в світі: «Стриж», «Волга-2», «Орлятко», «Лунь». Відомі проекти екранопланів «Columbia», «Aerofoilboat» X-112, X-113, X-114. В останні роки цій тематиці присвячені ряд міжнародних конференцій, де обговорювалися актуальні проблеми екранопланостроєння [32].

Підвищення швидкості руху транспорту більш 150 км / год призводить до виникнення ряду технічних проблем. До числа таких проблем відносяться:

- «Вібраційний бар'єр», що виникає в зв'язку з коливаннями, викликаними нерівностями опорної поверхні;
- «Тяговий бар'єр», обумовлений зниженням зчеплення колеса з опорною поверхнею (Рейкою);
- малий кліренс, гладкість опорної поверхні та інші підвищені вимоги, що пред'являються до дорожнього покриття;
- проблема відбору потужності двигуна на подолання сил опору, головним чином, аеродинамічного;
- падіння ходового якості при збільшенні швидкості руху

$$K = \frac{G}{X}, \quad (1.13)$$

де K - коефіцієнт ходового якості, G - повна вага транспортного засобу, X - сила його аеродинамічного опору;

- екологічні проблеми, викликані забрудненням навколишнього середовища продуктами згоряння двигуна, шумом тягової установки і системи підвіски;
- необхідність використання великих площ під спеціальне дорожнє покриття, будівництво і експлуатація якого вимагає значних капіталовкладень [86].

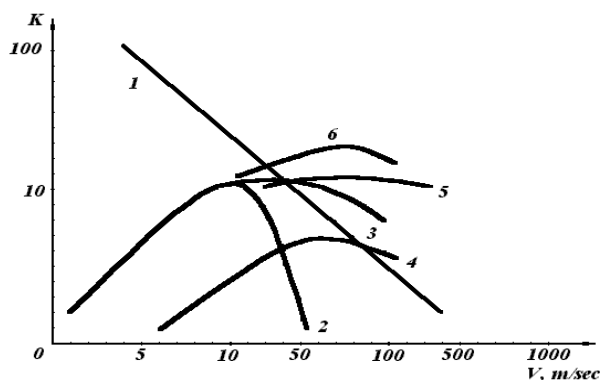


Рис. 1.1. Залежність коефіцієнта ходового якості транспортних засобів від швидкості руху

Порівняльний аналіз цих залежностей показує, що зі збільшенням швидкості згадане ходове якість K залізничного транспорту та інших колісних транспортних засобів (крива 1) монотонно падає, а для екранопланів (крива 6) - зростає і досягає максимального значення, рівного 40, при швидкості близько 350 км / год. Були проведені систематичні дослідження залежності ходового якості різних транспортних засобів в широкому діапазоні зміни швидкостей [71], результати яких представлені на рис. 1.1

Як видно з малюнка, існує критична точка, де ходове якість високошвидкісного залізничного екіпажу і зразка комбінованого транспортного засобу, що об'єднує в собі елементи звичайного колісного екіпажу та екіпажу з найкращими аеродинамічними властивостями (екраноплана) збігаються. Цій точці відповідає швидкість руху 120-150 км / год і значення коефіцієнта ходового якості рівного 20.

У зв'язку з цим, представляється доцільним розробка комбінованого транспортного засобу, що об'єднує в собі елементи колісного транспортного засобу і екраноплана [58, 103]. Така комбінована система забезпечує стабільне і високе значення коефіцієнта ходового якості (20 - 40), що не досягнуте жодним з відомих транспортних засобів. Так, наприклад, ходове якість вертольота (крива 4) не перевищує 7, літака (крива 5) - 15, судів на підводних крилах (крива 2) або повітряній подушці (крива 3) - 12.

1.5. Узагальнений алгоритм рішення задач динамічного проектування швидкісного екіпажу на основі обчислювального експерименту

Потреби практики проектування і експлуатації швидкісних транспортних екіпажів призводять до необхідності постановки задач динаміки в найбільш повної і загальної формі, при взаємодії просторових поступальних і обертальних рухів, при обліку великої кількості параметрів, що визначають інерційні, аеродинамічні, геометричні, конструкційні, енергетичні та інші характеристики, в

тому числі вплив зовнішнього середовища, збурень від вітру, його сили та напрямку. Особливої актуальності набувають питання виникнення, розвитку та встановлення резонансних режимів нелінійних просторових коливань, обумовлених перерозподілом кінетичної енергії між каналами руху [1, 6, 24, 25]. Такі нелінійні задачі динаміки асиметричного твердого тіла настільки складні, що їх рішення точними або наближеними аналітичними методами виявляється або неможливим, або недоцільним. Ця обставина призводить до необхідності широкого застосування обчислювального експерименту [47, 87-90, 100]. В процес динамічного проектування розглянутого транспортного екіпажу можуть бути закладені критерії економічності і комфорту.

Динамічне проектування розглянутого зразка високошвидкісного екіпажу призводить до необхідності врахування специфічних аеродинамічних ефектів і вітрових збурень. Для цієї мети будуються блокові математичні моделі, складаються блокові матриці, що враховують аеродинамічні сили і моменти при впливі швидкісного напору і збурень від вітру на асиметричні або осесиметричні підконструкції. Математична модель нелінійної динаміки транспортного екіпажу в просторовому русі побудована виключно на основі розробленого обчислення кватерніони матриць, що забезпечує значні зручності і гнучкість при проведенні обчислювальних експериментів [103].

Декомпозиція транспортного екіпажу на підконструкції, дозволяє відомими експериментально-розрахунковими методами визначати їх аеродинамічні характеристики: коефіцієнти сил і моментів, центри приведення [97]. Для кожної з підконструкцій складаються блокові матриці аеродинамічних сил і моментів, що формують праву частину рівнянь руху в формі Ейлера-Лагранжа, представлених кватерніонами матрицями. Місцевий просторовий кут атаки підконструкції знаходиться з урахуванням збурень від вітру. Швидкісний напір визначається за місцевої швидкості набігаючого потоку в центрі тиску підконструкції.

Побудована з підготовлених блоків матриць математична модель динаміки транспортного екіпажу здобуде необхідну симетрію, компактність,

універсальність і виявляється в значній мірі зручною в процесі підготовки і проведення обчислювальних експериментів. Доповнюючи наведений тут набір типових блоків матриць новими блоками, що описують інший характер взаємодії підконструкцій між собою і зовнішнім середовищем, вдається розширити коло розв'язуваних на основі обчислювального експерименту завдань динамічного проектування транспортного екіпажу. Запропонований підхід організації обчислювального експерименту забезпечує технологічну гнучкість і дозволяє оперативно вносити зміни в конструкцію, компоновочну схему, вихідні дані при оцінці динамічної ефективності тієї чи іншої модифікації транспортного екіпажу. Відзначимо також, що такий підхід дозволяє вирішувати складні нелінійні задачі динаміки транспортних екіпажів, залишаючись в фазовому просторі з кінцевим числом вимірів, співвідносити повноту математичного опису і розполагаемую потужність ПЕОМ. Складені матричні рівняння в формі Ейлера-Лагранжа пов'язують між собою кінематичні параметри руху в просторі - лінійні і кутові прискорення, швидкості, повороти і переміщення, інерційні характеристики - маса, осьові і відцентрові моменти інерції, положення центру мас, аеродинамічні характеристики - центр тиску, аеродинамічні коефіцієнти сил і моментів несе корпусу, енергетичні характеристики - величина, напрямок і точка прикладання сили тяги, характеристики ресорного підвішування. Тут, активні сили і моменти, що впливають на екіпаж покладаються заданими. Визначаються кінематичні параметри руху - пряме завдання [87, 90]; або за заданим режимом руху екіпажу визначаються потрібні сила тяги, аеродинамічні сили і моменти, дисипативні сили і сили пружності - зворотна задача [9, 60, 94, 102, 105, 106, 111, 112]. Далі застосовується метод цілеспрямованого пошуку М.М. Моїсеєва [89] для вибору параметрів екіпажу з тих чи інших оптимізаційних міркувань шляхом організації імітаційного моделювання - обчислювального експерименту, і спілкування з ПЕОМ в режимі діалогу [47,88].

2. ІНЕРЦІАЛЬНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ В ТЕХНІЦІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Інерціальні вимірювальні системи знайшли широке застосування в сучасних видах транспорту [43]. Вони відрізняються як за принципом дії, так і за конструктивним виконанням і призначені для вимірювання кінематичних параметрів руху - фазового стану об'єкта. Використання існуючих інерційних вимірювальних систем до потреб залізничного транспорту складає нове технічний напрям, актуальність якого зростає в міру збільшення швидкості рухомого складу. Реалізація цього технічного напрямку в залізничному транспорті, як видається, не може зустріти принципових труднощів, так як підготовлена багатою передісторією розвитку інерційних вимірювальних систем стосовно ракетноносіям, балістичним ракетами, космічним літальним апаратами, космічним транспортним кораблями, підводним і надводним судам, крилатим ракетами, літаками різного призначення. Для цих видів транспорту інерціальні вимірювальні системи служать вирішенню завдань навігації, управління, стабілізації [4, 15, 35, 36, 44, 46]. Очевидно, що теоретичні основи, функціональні елементи розроблених інерційних вимірювальних систем можуть бути використані для вирішення завдань безпеки, динамічної міцності, комфортності руху залізничних екіпажів на високошвидкісних магістралях [3, 12, 14, 39, 49, 85, 110, 117].

2.1. Інерціальні вимірювальні системи

Завдання інерційної вимірювальної системи полягає у визначенні фазового стану об'єкта, тобто параметрів, що характеризують стан полюса і орієнтацію базових напрямків в просторі, лінійну і кутову швидкість і прискорення. Інерціальна вимірювальна система включає в себе комплекс технічних засобів, необхідних для контролю фазового стану об'єкта. [4, 8, 15, 46, 98, 118]. У загальному випадку для повного виміру фазового стану об'єкта інерціальна вимірювальна система будується на основі блоку елементів, що складаються з

трьох лінійних акселерометрів і трьох кутових акселерометрів, осі яких утворюють перший і другий ортогональні базові ТРИЕДР. Крім блоку інерційних елементів, вимірювально-обробний комплекс включає в себе обчислювальній машині і блок вироблення моментів компенсації. Принципова схема інерційної вимірювальної системи представлена на рис. 1.1. Тут, основним вузлом системи є блок чутливих елементів, що представляє собою жорстку конструкцію з шістьма інерційними елементами: трьома кутовими акселерометрами (наприклад, гіроскопічні датчики кутової швидкості) і трьома лінійними акселерометрами, головні осі яких попарно збігаються і утворюють ортогональний ТРИЕДР. Акселерометри розміщуються на платформі в триступеневої підвісі по осях якого встановлюються датчики кутів і датчики моментів для вироблення моментів компенсації збурень. Відповідно до заданим алгоритмом ЕОМ перетворює вимірювану акселерометрами інформацію в шукані кінематичні параметри руху. Вимоги, що пред'являються до технічних засобів вимірювально-обробного комплексу, включають характеристики швидкодії, часу безвідмовної роботи, обмеження на розмір, вага і т.д. [98]. У зв'язку з цим, що застосовуються в даний час і розробляються інерціальні вимірювальні системи відрізняються між собою як різноманітністю фізичних принципів і методів вимірювання, так і технічних засобів їх реалізації.

Поряд з гіростабілізованого розглядаються безплатформенні або бескарданні інерціальні вимірювальні системи. Тут осі базових ТРИЕДР лінійних і кутових акселерометрів суміщені між собою і жорстко зв'язуються безпосередньо з осями корпусу об'єкта. Це дозволяє виключити з системи складний механічних підвіс з багатьма ступенями свободи, зменшити вагу і габарити, підвищити надійність і забезпечує зручність розміщення чутливих елементів на об'єкті. Разом з тим алгоритм перетворення вихідної інформації акселерометрів ускладнюється і збільшується обсяг обчислень на ЕОМ.

В якості чутливих елементів використовуються високоточні акселерометри і гіроскопи, дія яких заснована на різних фізичних і конструктивних принципах, які використовують інерцію і здатні виявляти кінематичні параметри кутового і

лінійного просторового руху. Використовуються фізичні ефекти лазера і ядерних частинок, електромагнітних і електричних полів, електронних і іонних потоків, елементів кріогенної та СВЧ-техніки, силочутливі властивостей рп переходів, закономірності пневматики і гідравліки, а також вібрацію і д.р. Електромеханічні акселерометри традиційного використання в даний час удосконалюються конструктивно і за рахунок технології виготовлення.

2.2. Передісторія інерційних вимірювальних систем

Вперше просторова інерціальна вимірювальна система, що складається з трьох двоступеневих гіроскопів - гіротахометров і трьох акселерометрів, розташованих на борту літака Р-5, була ефективно використана в 1934 році В.С. Ведрова, Н.А. Пілюгін і їх колегами з ЦАГІ для аналізу динаміки літака при вирішенні проблеми виходу з «штопора». У цій роботі наводиться найбільш повне рішення задачі просторової інерціальної навігації стосовно актуальної технічної проблеми «штопора» літака на основі диференціальних рівнянь Ейлера і системи рівнянь Ньютона [43]. За виміряним і записаним за часом трьома складовими кутової швидкості літака і трьома складовими перевантажень чисельним рішенням складеної системи диференціальних рівнянь визначалася траєкторія руху і орієнтація фюзеляжу в процесі несталого штопора і при виході з нього. У цій роботі були закладені основні ідеї бескарданной інерційної вимірювальної системи, яка широко застосовується в даний час.

Основні елементи інерційної вимірювальної системи, що використовує гіростабілізованого платформу, були розроблені і застосовані В. Брауном при управлінні і стабілізації руху балістичної ракети дальньої дії V-2 [116]. Комплект приладів інерціальної системи ракети V-2 складався з вільних гіроскопів, гіроскопического інтегратора здаються прискорень, розміщених в приладовому відсіку і орієнтованих щодо поздовжньої осі ракети. На гіростабілізований платформі розміщувалися митників акселерометри з магнітоелектричними датчиками моменту для вимірювання бічних прискорень, управління дальністю

польоту і кутовий стабілізації. За свідченнями інтегратора прискорень визначався момент відключення двигуна для досягнення необхідної дальності. Показання акселерометрів інтегрувалися допомогою електролітичних елементів.

У повоєнні роки інерціальні вимірювальні системи гіростабілізованого і безплатформенні інтенсивно розробляються в ракетно-космічній і авіаційній техніці для вирішення завдань управління, навігації, точності стрільби і технологія їх виготовлення постійно вдосконалювалася [8, 35, 36, 81, 118]. Високими технологіями по створенню сучасних інерційних вимірювальних систем різного призначення мають США, Росія, Франція. Зокрема, Францією на ракетноносії «Аріан-5» використовується безплатформенної інерціальна вимірювальна система, чутливі елементи якої розміщуються безпосередньо на борту, що забезпечує малі габарити, надійність і зручність розміщення приладів при достатній точності вимірювань.

4. БЕСПЛАТФОРМЕННІ ІНЕРЦІАЛЬНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

В останні роки інерціальні вимірювальні системи - гіростабілізовані і безплатформенні досягли високого рівня досконалості, де використовуються високоточні мініатюрні акселерометри і обчислювальна техніка [35, 36, 98]. Очевидно, інерціальна вимірювальна система тієї чи іншої модифікації може бути використана і на залізничному транспорті для вирішення розглянутих завдань, пов'язаних з визначенням динамічної навантаженості високошвидкісних екіпажів [3, 14, 107]. У інерційних системах в якості чутливих елементів використовуються високоточні акселерометри, дія яких заснована на різних фізичних і конструктивних принципах, які використовують інерцію і здатні виявляти лінійну і кутову швидкість і прискорення.

Особливість даної в цьому розділі завдання залізничного транспорту полягає в використанні безплатформенної інерційної вимірювальної системи, чутливі елементи якої розташовуються безпосередньо на елементах конструкції швидкісного вагона, де технічно можливий їх монтаж. Безплатформенної інерціальна вимірювальна система дозволяє безперервно вимірювати проекції векторів лінійної і кутової швидкості і прискорення в осях, пов'язаних з відповідним конструктивним елементом залізничного екіпажу щодо інерціального простору в процесі руху по досліджуваному реальному ділянці шляху. Опис деяких існуючих безплатформенної інерційних вимірювальних систем і особливості їх функціонування викладені в Розділі 2.

4.1. Динамічна реакція взаємодії кузова вагона і надресорної балки

У роботі, при викладі обчислювального методу було показано (3.18) що, вважаючи в рівняннях Ейлера-Лагранжа експериментально знайденими за допомогою гіростабілізованій інерційної вимірювальної системи кінематичні

параметри руху кузова у вигляді квазіскоростей (ω_{y1}, V_{oy1}) і квазіускорень ($\dot{\omega}_{y1}, \dot{V}_{oy1}$), А також вважаючи заданими інерційні характеристики кузова (\bar{I}_{y1}, m_1), Координати центру мас (Y_{c1}) і інші параметри можна визначити внутрішню динамічну реакцію кузова вагона на надресорних балку в явній аналітичній формі у вигляді вектора моменту і сили M_{y1}^K, N_{y1}^K :

$$-\frac{1}{m_1} \begin{Bmatrix} M_{y1}^K \\ N_{y1}^K \end{Bmatrix} = g \begin{Bmatrix} \frac{1}{2}({}^tY_{c1} + Y_{c1}) \\ E_0 \end{Bmatrix} R_1^t \times {}^tR_1^t \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{Bmatrix} + \frac{1}{m_1} \begin{Bmatrix} M_{y1} \\ Q_{y1} \end{Bmatrix} + \varepsilon_1(T) \quad (4.1)$$

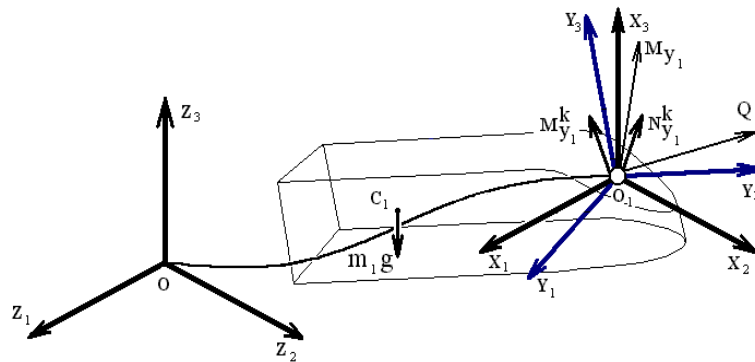


Рис. 4.1. Динамічна схема кузова вагона

де $\frac{1}{m_1} \begin{Bmatrix} M_{y1} \\ Q_{y1} \end{Bmatrix}$ – віднесені до маси кузова блокові матриці заданих узагальнених

активних сил і моментів, включаючи аеродинамічні впливу і тягу (рис. 4.1.)

$\varepsilon_1(T)$ – ейлерів оператор для кузова вагона, виражений в кватерніони матрицях:

$$\varepsilon_1(T) = \begin{Bmatrix} \bar{I}_{y1} \\ \frac{1}{2}({}^tY_{c1} + Y_{c1}) \\ E_0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{1}{2}({}^t\Omega_{y1} + \Omega_{y1}) \\ \frac{1}{2}({}^tV_{y1} + V_{y1}) \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{1}{2}({}^tY_{c1} + Y_{c1}) \\ E_0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\omega}_{y1} \\ \dot{V}_{oy1} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{I}_{y1} \\ \frac{1}{2}({}^tY_{c1} + Y_{c1}) \\ E_0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{1}{2}({}^t\Omega_{y1} + \Omega_{y1}) \\ \frac{1}{2}({}^tV_{y1} + V_{y1}) \\ 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_{y1} \\ V_{oy1} \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

У наведеному ейлеровом операторі

- перший матричний блок визначає тангенціальні інерційні сили і моменти, які проявляються в перехідних режимах руху, при прискоренні і гальмуванні;

- другий матричний блок характеризує відцентрові, гіроскопічні і коріолісову сили і моменти, які проявляються при русі в кривих з урахуванням плану і профілю колії, локальних нерівностей. Експериментальні дані вимірювально-обробного комплексу про кінематичні параметри руху, матриця інерції кузова, матриці узагальнених сил і моментів, сили тяжіння, матриці інерційних компонент формуються і визначаються в пов'язаній з кузовом системі координат.

4.2. Динамічна реакція взаємодії надресорної балки і рами візка

Відділимо надресорну балку від кузова вагона і рами візка, введемо, згідно принципу звільності від зв'язків, відповідні динамічні реакції у вигляді моментів $M_{y_2}^K, M_{y_2}^H$ і сил $N_{y_2}^K, N_{y_2}^H$ і наводимо їх до системи осей $O_2Y_1Y_2Y_3$, Пов'язаних з надресорною балкою (рис. 4.2.).

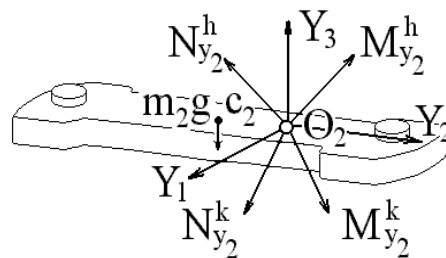


Рис. 4.2. Динамічна схема надресорної балки

Тут становище полюса O_2 і орієнтація пов'язаної системи координат $O_2Y_1Y_2Y_3$ визначаються зручністю розміщення чутливих елементів бесплатформенной інерційної вимірювальної системи безпосередньо на балці і особливостями функціонування чутливих елементів. Вважаємо, що проєкції вектора швидкості V_{i0y_2} полюса O_2 і вектор кутовий швидкості ω_{iy_2} ($i=1,2,3$) балки вдається безпосередньо виміряти з достатньою точністю бесплатформенной інерційної вимірювальною системою. Задані інерційні характеристики надресорної балки: m_2 – маса, I_{y_2} – матриця інерції, y_{ic_2} ($i=1,2,3$) – координати центру мас, активні і

пасивні дії, включаючи певну вище динамічну реакцію кузова. Тоді, шукана динамічна реакція рами візка на балку може бути визначена в явній аналітичній формі за допомогою рівнянь Ейлера-Лагранжа:

$$-\frac{1}{m_2} \left\| \frac{M_{y_2}^H}{N_{y_2}^H} \right\| = g \left\| \frac{\frac{1}{2}(Y_{c_2} + Y_{c_2}')}{E_0} \right\| R_2' \times R_2' \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \frac{1}{m_2} \left\| \frac{M_{y_1}^K}{N_{y_1}^K} \right\| + \varepsilon_2(T), \quad (4.3)$$

де

$$\varepsilon_2(T) = \left\| \frac{\bar{I}_{y_2}}{\frac{1}{2}(Y_{c_2}' + Y_{c_2}')'} \right\| \left\| \frac{\frac{1}{2}(Y_{c_2} + Y_{c_2}')}{E_0} \right\| \left\| \frac{\dot{\omega}_{y_2}}{\dot{V}_{0y_2}} \right\| + \left\| \frac{\frac{1}{2}(Y_{c_2} + Y_{c_2}')}{E_0} \right\| \left\| \frac{\frac{1}{2}(V_{y_2} + V_{y_2}')}{\frac{1}{2}(Y_{c_2} + Y_{c_2}')'} \right\| \left\| \frac{\bar{I}_{y_2}}{\frac{1}{2}(Y_{c_2}' + Y_{c_2}')'} \right\| \left\| \frac{\omega_{y_2}}{V_{0y_2}} \right\|. \quad (4.4)$$

Ейлеров оператор $\varepsilon_2(T)$ характеризує динамічний вплив на раму візка, обумовлене інерційними властивостями надресорної балки.

4.3. Динамічна реакція взаємодії рами візка і колісної пари

Далі ізолюємо раму візка від надресорної балки і колісної пари, ввівши відповідні реакції зв'язків $M_{y_3}^H$, $N_{y_3}^H$, $M_{y_3}^W$, $N_{y_3}^W$. Наведені до системи осей $O_3 Y_1 Y_2 Y_3$, Пов'язаних з рамою візка (рис. 4.3.)

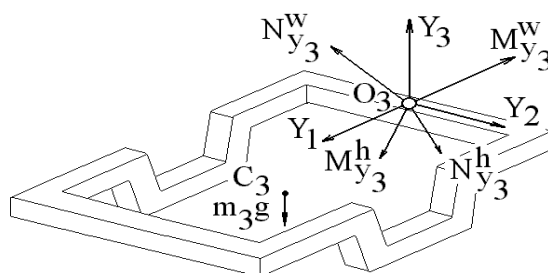


Рис. 4.3. Динамічна схема рами візка

Положення і орієнтація введених осей координат обумовлено функціонуванням безплатформенної інерційної вимірювальної системи, розміщеної на рамі візка для вимірювання вектора лінійної швидкості V_{i0y_3}

полюса O_3 і вектора кутової швидкості рами ω_{iy_3} ($i=1,2,3$). Шукане динамічний вплив рами візка на колісну пару визначається аналогічним чином за допомогою рівнянь Ейлера-Лагранжа.

$$-\frac{1}{m_3} \left\| \frac{M_{y_3}^W}{N_{y_3}^W} \right\| = g \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t Y_{c3} + Y_{c3})}{E_0} \right\| R_3^t \times {}^t R_3^t \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \frac{1}{m_3} \left\| \frac{M_{y_3}^N}{N_{y_3}^N} \right\| + \varepsilon_3(T) \quad (4.5)$$

де

$$\varepsilon_3(T) = \left\| \frac{\bar{I}_{y_3}}{\frac{1}{2}(Y_{c3}^t + {}^t Y_{c3}')} \right\| \frac{\frac{1}{2}({}^t Y_{c3} + Y_{c3})}{E_0} \left\| \frac{\dot{\omega}_{y_3}}{\dot{V}_{0y_3}} \right\| + \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t \Omega_{y_3} + \Omega_{y_3})}{0} \right\| \frac{\frac{1}{2}({}^t V_{y_3} + V_{y_3})}{\frac{1}{2}({}^t \Omega_{y_3} + \Omega_{y_3})} \left\| \frac{\bar{I}_{y_3}}{\frac{1}{2}(Y_{c3}^t + {}^t Y_{c3}')} \right\| \frac{\frac{1}{2}({}^t Y_{c3} + Y_{c3})}{E_0} \left\| \frac{\omega_{y_3}}{V_{0y_3}} \right\|. \quad (4.6)$$

Тут необхідні вихідні дані по інерційним характеристикам рами візка, геометричним і конструктивним параметрам покладаються відомими, а кінематичні параметри – експериментально знайденими за допомогою бесплатформенної інерційної вимірювальної системи.

5. ДИНАМІЧНА РЕАКЦІЯ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІСНОЇ ПАРИ І РЕЙКИ

Послідовно відокремлюємо колісну пару від рами візка і вводимо знайдену вище динамічну реакцію $M_{y_4}^w$, $N_{y_4}^w$ і невідому динамічну реакцію рейки на колесо $M_{y_4}^r$, $N_{y_4}^r$, Наведені до системи осей $O_4 Y_1 Y_2 Y_3$, Пов'язаних з буксовими вузлом колісної пари (рис. 5.1).

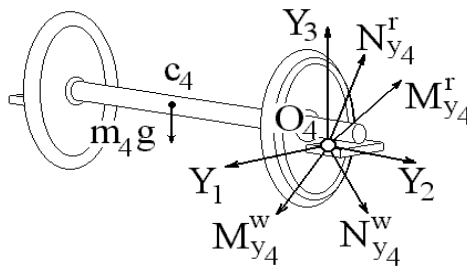


Рис. 5.1. Динамічна схема колісної пари

Безплатформенна інерціальна вимірювальна система, розміщена безпосередньо на буксовому вузлі дозволить вимірювати вектор лінійної швидкості V_{i0y_4} полюса O_4 і вектор кутової швидкості $\omega_{iy_4}^w$ ($i=1,2,3$) повороту колісної пари, виключаючи її обертання. Кутова швидкість обертання колісної пари ω^w знаходиться незалежно від інерційної системи по заданій швидкості поступального руху швидкісного вагона – V_∞ :

$$\omega^w = \frac{V_\infty}{r},$$

де r – радіус колеса.

Тоді результуючий вектор кутової швидкості колісної пари визначається у вигляді суми:

$$\bar{\omega}_{y_4} = \bar{\omega}_{y_4}^w + \bar{\omega}^w,$$

а шукані квазіскорості ω_{iy_4} ($i=1,2,3$) як проекції результуючого вектора кутової швидкості колісної пари на пов'язані осі $O_4 Y_1 Y_2 Y_3$.

Очевидно, що з рівнянь руху Ейлера-Лагранжа для колісної пари безпосередньо слідує шукані формули для динамічної реакції колеса на рейку:

$$-\frac{1}{m_4} \left\| \frac{M_{y_4}^R}{N_{y_4}^R} \right\| = g \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t Y_{c4} + Y_{c4})}{E_0} \right\| R_4^t \times {}^t R_4^t \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \frac{1}{m_4} \left\| \frac{M_{y_4}^W}{N_{y_4}^W} \right\| + \varepsilon_4(T) \quad ,$$

де

$$\varepsilon_4(T) = \left\| \frac{\bar{I}_{y_4}}{\frac{1}{2}(Y_{c4}^t + {}^t Y_{c4}^t)} \right\| \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t Y_{c4} + Y_{c4})}{E_0} \right\| \left\| \frac{\dot{\omega}_{y_4}}{\dot{V}_{0y_4}} \right\| + \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t \Omega_{y_4} + \Omega_{y_4})}{0} \right\| \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t V_{y_4} + V_{y_4})}{\frac{1}{2}({}^t \Omega_{y_4} + \Omega_{y_4})} \right\| \left\| \frac{\bar{I}_{y_4}}{\frac{1}{2}(Y_{c4}^t + {}^t Y_{c4}^t)} \right\| \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t Y_{c4} + Y_{c4})}{E_0} \right\| \left\| \frac{\omega_{y_4}}{V_{0y_4}} \right\| .$$

Ейлеров оператор для колісної пари $\varepsilon_4(T)$ містить задані геометричні й інерційні характеристики, а також вимірювані безплатформенної інерційної вимірювальною системою кінематичні параметри. Відзначимо, що тут вдається оцінити роль гіроскопічною складової інерційних сил в динамічній взаємодії колісної пари і рейки, яка при високошвидкісному русі виявляється суттєвою (другий матричний блок в операторі $\varepsilon_4(T)$).

5.1. Оцінка впливу локальних нерівностей залізничного шляху на динамічну навантаженість колісної пари швидкісного екіпажу

Динамічна навантаженість колісної пари високошвидкісного залізничного екіпажу визначається при проходженні локальних нерівностей шляху, наводиться блочно-матрична формула розрахунку інерційних сил і моментів при русі по просторовій траєкторії з урахуванням кручення і кривизни шляху в плані і профілі. Для розрахунку використовуються локальні нерівності колії, які визначаються відомими методами і засобами вимірювання геометричних параметрів рейкових шляхів, включаючи безплатформенні інерціальні модулі на лазерних гіроскопах [3, 49]. По заданій траєкторії рейкового шляху будується годограф руху колісної пари в залежності від введеного безрозмірного часу, а для

геометричних параметрів вводяться безрозмірні змінні. По побудованій годографу обчислюються кінематичні параметри руху, необхідні для кількісної оцінки динамічної навантаженості колісної пари. Отримані результати дозволяють проводити аналіз силової взаємодії колісної пари і рейок, а також визначати показники безпеки руху на високошвидкісних ділянках залізниць.

Постановка технічного завдання

Локальні нерівності шляху викликають вертикальні і горизонтальні поперчені коливання, що обертається з високою кутовою швидкістю колісної пари щодо візки, що призводить до появи коріолісових, гіроскопічних і відцентрових сил і моментів. Кількісна оцінка цих інерційних сил і моментів в загальному балансі силового взаємодії колісної пари і рейки в залежності від швидкості поступального руху і траєкторії залізничної колії становить актуальне завдання безпосередньо пов'язану з безпекою руху на високошвидкісних магістралях [22, 110, 117].

Матрична формула оцінки гіроскопіческих, коріолісових, відцентрових сил і моментів, що впливають на колісну пару. Застосовуючи нелінійні диференціальні рівняння просторового руху колісної пари в формі Ейлера-Лагранжа, отримана компактна блочно-матрична формула для визначення інерційних сил і моментів, обумовлених гіроскопічними, коріолісову, відцентровими складовими, що виникають при взаємодії обертається з високою швидкістю колісної пари і рейки з урахуванням кручення, кривизни шляху в плані і профілі (другий матричний блок в операторі Ейлера (3.14)):

$$-\frac{1}{m_r} \left\| \frac{M_{yr}^G}{N_{yr}^G} \right\| = \left\| \frac{\frac{1}{2}({}^t\Omega_{yr} + \Omega_{yr})}{0} \frac{\frac{1}{2}({}^tV_{yr} + V_{yr})}{\frac{1}{2}({}^t\Omega_{yr} + \Omega_{yr})} \right\| \times \left\| \frac{\bar{I}_{yr}}{\frac{1}{2}({}^tY_{cr} + {}^tY_{cr}^t)} \frac{\frac{1}{2}({}^tY_{cr} + Y_{cr})}{E_0} \right\| \left\| \frac{\omega_{yr}}{V_{0yr}} \right\|. \quad (5.1)$$

тут E_0 - одинична матриця - (4×4) ;

$Y_{cr}, {}^tY_{cr}, Y'_{cr}, {}^tY'_{cr}$ - кватерніонами матриці, складені по координатам центру мас колісної пари в базовому ТРІЕДР, що визначаються за допомогою компонуальною схеми;

$\Omega_{yr}, {}^t\Omega_{yr}$ - кватерніонами матриці, складені за компонентами кутової швидкості колісної пари в базовому ТРІЕДР. Для розглянутої тут технічної задачі компоненти кутової швидкості крену і повороту нехтує малі в порівнянні з кутовою швидкістю обертання колісної пари, тобто вважаємо $\omega_1 = 0, \omega_3 = 0$,

$$\omega_2 = \frac{V_\infty}{r},$$

де V_∞ - задана поступальна швидкість залізничного екіпажу; r - радіус колеса; $V_{yr}, {}^tV_{yr}$ - кватерніонами матриці, складені за компонентами лінійної швидкості полюса колісної пари в базовому ТРІЕДР.

тут, V_{0yr1} - швидкість поступального руху колісної пари ($V_{0yr1} = V_\infty$); V_{0yr2} - швидкість бічних і V_{0yr3} - швидкість вертикальних коливань колісної пари, обумовлені локальними нерівностями шляху, що визначаються відповідно до методики, викладеної нижче; \bar{I}_{yr} - приведена до масі матриця інерції колісної пари в базовому ТРІЕДР, розрахована за вихідними даними колісної пари візка КВЗ И2.

Тут, компоненти кутовий і лінійної швидкості колісної пари, прийняті в якості квазіскоростей, можуть бути безпосередньо виміряні мініатюрної бесплатформенної інерційної вимірювальною системою, чутливі елементи якої розміщені на буксовими вузлі і визначають орієнтацію пов'язаної системи координат. Шукані квазіскорості вимірюються безперервно в процесі руху колісної пари по рейці з урахуванням локальних нерівностей, плану і профілю колії.

Основні параметри колісної пари і системи координат

Основні параметри колісної пари візка КВЗ И2 наводиться на рис. 5.1а .:

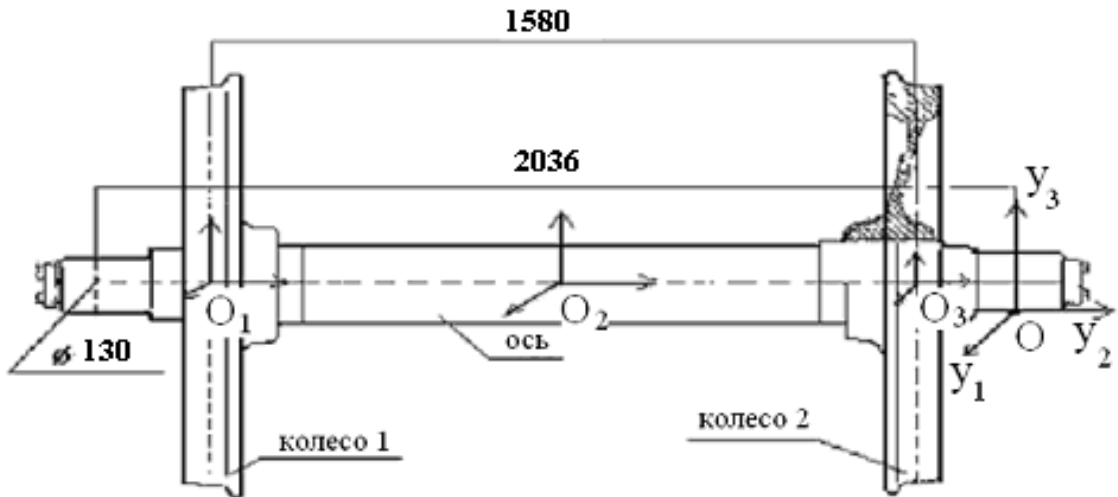


Рис. 5.1а. Основні параметри колісної пари візка КВЗ И2

Тут, основні геометричні параметри колісної пари задані конструктивно, номінальними розмірами. Введемо системи координат, пов'язані з кожним колесом (полюс O_1, O_3) і віссю (полюс O_2) в геометричному центрі симетрії. Осі введених систем координат орієнтовані по геометричним осям симетрії розглянутих елементів конструкції. Нехай базовий ТРИЕДР інерційної вимірювальної системи (полюс O) розташований і орієнтований на буксовими вузлі згідно рис. 5.1. Тоді, координати полюсів коліс і осі колісної пари в базовому ТРИЕДР відповідно рівні:

$$O_1(0; -1.803; 0.065), O_2(0; -1.018; 0.065), O_3(0; -0.233; 0.065).$$

Інерційні характеристики колісної пари

Номінальні величини мас коліс і осі колісної пари відповідно рівні $m_1 = 378$ кг, $m_2 = 335$ кг, $m_3 = 378$ кг. В силу випадкових факторів фактична величина мас елементів конструкції може змінюватися в межах відомих допусків на виготовлення $\pm \Delta m_i$, Тобто $m_i \pm \Delta m_i$ ($i = 1, 2, 3$). Похибки виготовлення і монтажу призводять до відхилень фактичних координат центрів мас коліс і осі колісної

пари від геометричних центрів симетрії в межах заданих допусків $\pm \varepsilon_j^{ci}$ ($j = 1, 2, 3$). Вважаємо, що величини головних центральних моментів інерції коліс і осі колісної пари також змінюються в межах заданих допусків на виготовлення $I_{jj}^{ci} \pm \Delta I_{jj}^{ci}$. Причому, очевидно, що $I_{11}^{c1} = I_{33}^{c1}$, $I_{jj}^{c1} = I_{jj}^{c3}$, $\Delta I_{jj}^{c1} = \Delta I_{jj}^{c3}$. Номінальні величини головних центральних моментів інерції осі колісної пари і коліс задані діагональними матрицями:

$$I_{yr}^{c2} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 160.68 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.78 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 160.68 \end{vmatrix} \quad I_{yr}^{c1} = I_{yr}^{c3} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 28.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 54.83 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 28.08 \end{vmatrix}$$

5.2. Алгоритм розрахунку матриці інерції колісної пари

Матриця інерції колісної пари \bar{I}_{yr} , Віднесена до її масі, може бути знайдена відповідно до [28, 114]. Тут для приведення матриці інерції до досліджуваних пов'язаним осях використовується алгоритм, побудований на основі кватерніони матриць [82]:

$$2\bar{I}_{yr} = 2A \times^t A \times \bar{I}_{or} \times A^t \times^t A^t + (Y_{cr} + {}^t Y_{or}) \times (Y_{or}^t + {}^t Y_{or}^t) + Y_{or} (Y_{cr}^t + {}^t Y_{cr}^t) \quad (5.2)$$

де \bar{I}_{or} - приведена до масі m_r матриця інерції колісної пари щодо системи осей, що визначаються полюсом з координатами y_{ori} ($i=1,2,3$) і орієнтованих щодо введених пов'язаних осей за допомогою параметрів Родріга-Гамільтона a_j ($j=0,1,2,3$); $A, {}^t A, A^t, {}^t A^t, Y_{or}, {}^t Y_{or}, Y_{or}^t, {}^t Y_{or}^t, Y_{cr}, {}^t Y_{cr}, Y_{cr}^t, {}^t Y_{cr}^t$ - кватерніонами матриці, складені відповідно за параметрами Родріга-Гамільтона a_j ($j=0,1,2,3$), Координатам полюса y_{ori} ($i=1,2,3$), Координатам центру мас колісної пари y_{cri} ($i=1,2,3$) в пов'язаних осях або в розгорнутій записи:

$$A = \begin{vmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 \\ -a_1 & a_0 - a_3 & a_2 & \\ -a_2 & a_3 & a_0 - a_1 & \\ -a_3 - a_2 & a_1 & a_0 & \end{vmatrix}, Y_{or} = \begin{vmatrix} 0 & y_{or1} & y_{or2} & y_{or3} \\ -y_{or1} & 0 & -y_{or3} & y_{or2} \\ -y_{or2} & y_{or3} & 0 & -y_{or1} \\ -y_{or3} - y_{or2} & y_{or1} & 0 & \end{vmatrix}, Y_{cr} = \begin{vmatrix} 0 & y_{cr1} & y_{cr2} & y_{cr3} \\ -y_{cr1} & 0 & -y_{cr3} & y_{cr2} \\ -y_{cr2} & y_{cr3} & 0 & -y_{cr1} \\ -y_{cr3} - y_{cr2} & y_{cr1} & 0 & \end{vmatrix}.$$

Зокрема, при поєднанні полюса і центру мас колісної пари, тобто $y_{ori} = y_{cri}$, Отримаємо відповідно $Y_{cr} = Y_{or}$, $Y_{cr}^t = Y_{or}^t$, ${}^t Y_{cr} = {}^t Y_{or}$, ${}^t Y_{cr}^t = {}^t Y_{or}^t$ і, з огляду на, що $Y_c + {}^t Y_c^t = 0$, знайдемо

$$2\bar{I}_{yr} = 2A \times {}^t A \times \bar{I}_{cr} \times A^t \times {}^t A^t + Y_{cr} (Y_{cr}^t + {}^t Y_{cr}^t), \quad (5.3)$$

де \bar{I}_{cr} - матриця інерції, складена по головним центральним моментам інерції, що належать до масі m ,

$$\bar{I}_{cr} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{I}_{11}^{cr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{I}_{22}^{cr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{I}_{33}^{cr} \end{vmatrix}.$$

У разі, коли головні центральні осі інерції відповідно паралельні введеним пов'язаним осях, маємо

$$A = E_o \quad {}^t A = E_o \quad A^t = E_o \quad {}^t A^t = E_o,$$

де E_o - одинична (4×4) матриця, наведена формула спрощується і набуває вигляду:

$$2\bar{I}_{yr} = 2\bar{I}_{cr} + Y_{cr} (Y_{cr}^t + {}^t Y_{cr}^t) \quad (5.4)$$

або в розгорнутій записи [114]

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{I}_{11}^{yr} - \bar{I}_{12}^{yr} - \bar{I}_{13}^{yr} \\ 0 - \bar{I}_{21}^{yr} & I_{22}^{yr} - \bar{I}_{23}^{yr} \\ 0 - \bar{I}_{31}^{yr} - \bar{I}_{32}^{yr} & I_{33}^{cr} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{I}_{11}^{cr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{I}_{22}^{cr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{I}_{33}^{cr} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{cr3}^2 + y_{cr2}^2 & -y_{cr2} y_{cr1} & -y_{cr3} y_{cr1} \\ 0 & -y_{cr1} y_{cr2} & y_{cr3}^2 + y_{cr1}^2 & -y_{cr3} y_{cr2} \\ 0 & -y_{cr1} y_{cr3} & -y_{cr2} y_{cr3} & y_{cr2}^2 + y_{cr1}^2 \end{vmatrix}. \quad (5.5)$$

5.3. Алгоритм складання матриці інерції колісної пари при обліку похибок виготовлення і монтажу

Орієнтація головних центральних осей інерції коліс і осі колісної

пари щодо геометричних осей симетрії (введених пов'язаних систем координат) визначимо кутами Ейлера-Крилова, які, в силу поставленої технічної задачі, є малими величинами і вибираються в межах заданих допусків: $\pm\Delta\alpha^{ci}$, $\pm\Delta\beta^{ci}$, $\pm\Delta\gamma^{ci}$. Перетворення головних центральних моментів інерції коліс і осі колісної пари до власних геометричних осей симетрії проводиться за наступною розрахунковою формулою, що враховує перенесення і поворот в просторі:

$$2\bar{I}_{O_i} = 2\Delta_{ci} \times {}^t\Delta_{ci} \times \bar{I}^{ci} \times \Delta_{ci}^t \times {}^t\Delta_{ci}^t + E_{ci}(E_{ci}^t + {}^tE_{ci}^t). \quad (5.6)$$

тут

$$\bar{I}^{ci} = \frac{1}{m_i} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{11}^{ci} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{22}^{ci} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{33}^{ci} \end{pmatrix}, \quad E_{ci} = \begin{pmatrix} 0 & \varepsilon_1^{ci} & \varepsilon_2^{ci} & \varepsilon_3^{ci} \\ -\varepsilon_1^{ci} & 0 & -\varepsilon_3^{ci} & \varepsilon_2^{ci} \\ -\varepsilon_2^{ci} & \varepsilon_3^{ci} & 0 & -\varepsilon_1^{ci} \\ -\varepsilon_3^{ci} & -\varepsilon_2^{ci} & \varepsilon_1^{ci} & 0 \end{pmatrix}, \quad \Delta_{ci} = \begin{pmatrix} \delta_0^{ci} & \delta_1^{ci} & \delta_2^{ci} & \delta_3^{ci} \\ -\delta_1^{ci} & \delta_0^{ci} - \delta_3^{ci} & \delta_2^{ci} & \delta_2^{ci} \\ -\delta_2^{ci} & \delta_3^{ci} & \delta_0^{ci} - \delta_1^{ci} & \delta_2^{ci} \\ -\delta_3^{ci} - \delta_2^{ci} & \delta_1^{ci} & \delta_0^{ci} & \delta_0^{ci} \end{pmatrix}.$$

Параметри Родріга-Гамільтона δ_j^{ci} ($j=0,1,2,3$) визначаються по заданим вище кутах Ейлера-Крилова у вигляді (2.2):

$$\begin{pmatrix} \delta_0^{ci} \\ \delta_1^{ci} \\ \delta_2^{ci} \\ \delta_3^{ci} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \cos \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} - \sin \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \sin \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \sin \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} \\ \cos \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \cos \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \sin \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} + \sin \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \sin \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} \\ -\sin \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \cos \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \sin \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} + \cos \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \sin \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} \\ \sin \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \cos \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \cos \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} + \cos \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \sin \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \sin \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} \end{pmatrix}. \quad (5.7)$$

З огляду на, що поворот головних центральних осей симетрії щодо геометричних осей симетрії малий, знайдемо

$$\begin{pmatrix} \delta_0^{ci} \\ \delta_1^{ci} \\ \delta_2^{ci} \\ \delta_3^{ci} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} \\ \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} + \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \\ \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} - \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} \\ \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} + \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} \end{pmatrix}, \quad (5.8)$$

далі, нехтуючи малими величинами другого порядку і вище, отримаємо

$$\left\| \begin{array}{c} \delta_0^{ci} \\ \delta_1^{ci} \\ \delta_2^{ci} \\ \delta_3^{ci} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} 1 \\ \frac{\Delta\alpha^{ci}}{2} \\ \frac{\Delta\beta^{ci}}{2} \\ \frac{\Delta\gamma^{ci}}{2} \end{array} \right\|, \quad (5.9)$$

з урахуванням розглянутих похибок на виготовлення і монтаж наведемо матриці інерції коліс і осі колісної пари до базового ТРІЕДР інерційної вимірювальної системи

$$\bar{I}_o^{\delta} = \sum_{i=1}^3 \frac{m_i}{m_1 + m_2 + m_3} \bar{I}_{oi}^{\delta}. \quad (5.10)$$

Тут, згідно з (5.2)

$$2\bar{I}_{oi}^{\delta} = 2A_i \times^t A_i \times \bar{I}_{oi} \times A_i^t \times^t A_i^t + (X_{ci}^t + {}^t X_{oi}^t)(X_{oi}^t + {}^t X_{oi}^t) + X_{oi} (X_{ci}^t + {}^t X_{ci}^t), \quad (5.11)$$

де A_i - кватерніонами матриці, складені по заданих параметрах Родріго-Гамільтона, що визначає орієнтацію геометричних осей симетрії коліс і осі колісної пари щодо базового ТРІЕДР;

X_{oi} - кватерніонами матриці, складені за заданим конструктивно координатам полюсів геометричних осей симетрії коліс і осі колісної пари в базовому ТРІЕДР;

X_{ci} - кватерніонами матриці, складені по координатам центрів мас коліс і осі колісної пари в базовому ТРІЕДР, які знаходяться за формулами:

$$\begin{aligned} X_{ci} &= X_{oi} + A_i \times E_{ci} \times^t A_i^t, \\ X_{ci}^t &= X_{oi}^t + {}^t A_i \times E_{ci}^t \times A_i^t, \\ {}^t X_{ci}^t &= {}^t X_{oi}^t + A_i \times^t E_{ci}^t \times^t A_i^t. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Таким чином, за отриманими матричних формулами визначається матриця інерції колісної пари в цілому, наведена до системи координат, пов'язаної з базовим ТРІЕДР інерційної вимірювальної системи і з урахуванням технологічних похибок на виготовлення. Формулу, виражену в кватерніони матрицях, відрізняє симетрія структури і компактність, що забезпечує зручність і ефективність реалізації алгоритму на ЕОМ. Програма обчислення матриці інерції та обчислення матриці інерції розглянутої колісної пари в цілому, в системі

координат, пов'язаної з базовим ТРІЕДР, а результуюча матриця інерції має вигляд:

$$\bar{I}_{yr} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.666 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.105 & 0.066 \\ 0 & 0 & 0.066 & 1.662 \end{vmatrix}. \quad (5.13)$$

5.4. Методика побудови годографа руху колісної пари за експериментальними даними колієвимірювача

Кінематичні параметри руху колісної пари, необхідні для визначення шуканих інерційних сил і моментів, обумовлених локальними нерівностями шляху, можуть бути безпосередньо отримані з достатнім ступенем точності за допомогою різних методів і засобів контролю геометричних параметрів рейкових шляхів, включаючи інерційні і неконтактні вимірювання [49]. Зокрема, в системі оперативного контролю технічного стану залізничної колії застосовуються безплатформенні інерціальні вимірювальні модулі на лазерних гіроскопах [3], розробляються комп'ютеризовані системи збору, обробки та передачі вимірювальної інформації [14]. В технології вимірювання поєднуються дані, отримані від супутникової системи глобального позиціонування і інерційних датчиків, в результаті чого виходить безперервний, стабільний і точний навігаційний сигнал. Об'єднання навігаційних даних з результатами оптичних вимірювань дозволяє з високою точністю виміряти геометричні параметри шляху і локалізувати їх по географічному розташуванню, тобто прив'язати по довжині шляху. Устаткування системи, що розміщується у вагоні колієвимірювача, розраховане на виконання вимірювань в звичайних експлуатаційних умовах, має малі габарити і масу, легко монтується. Оскільки в системі немає рухомих деталей і вузлів, вона проста в обслуговуванні. У датчиках і системі обробки даних використовуються досягнення космічної технології, завдяки цьому якість роботи не залежить від умов навколишнього середовища і усуває вплив динамічних явищ при русі вагона на точність вимірювань.

Об'єднання навігаційних даних з результатами оптичних вимірювань дозволяє з високою точністю виміряти геометричні параметри шляху і локалізувати їх по географічному розташуванню, тобто прив'язати по довжині шляху. Устаткування системи, що розміщується у вагоні колієвимірювача, розраховане на виконання вимірювань в звичайних експлуатаційних умовах, має малі габарити і масу, легко монтується. Оскільки в системі немає рухомих деталей і вузлів, вона проста в обслуговуванні. У датчиках і системі обробки даних використовуються досягнення космічної технології, завдяки цьому якість роботи не залежить від умов навколишнього середовища і усуває вплив динамічних явищ при русі вагона на точність вимірювань. Об'єднання навігаційних даних з результатами оптичних вимірювань дозволяє з високою точністю виміряти геометричні параметри шляху і локалізувати їх по географічному розташуванню, тобто прив'язати по довжині шляху. Устаткування системи, що розміщується у вагоні колієвимірювача, розраховане на виконання вимірювань в звичайних експлуатаційних умовах, має малі габарити і масу, легко монтується. Оскільки в системі немає рухомих деталей і вузлів, вона проста в обслуговуванні. У датчиках і системі обробки даних використовуються досягнення космічної технології, завдяки цьому якість роботи не залежить від умов навколишнього середовища і усуває вплив динамічних явищ при русі вагона на точність вимірювань. Устаткування системи, що розміщується у вагоні колієвимірювача, розраховане на виконання вимірювань в звичайних експлуатаційних умовах, має малі габарити і масу, легко монтується. Оскільки в системі немає рухомих деталей і вузлів, вона проста в обслуговуванні. У датчиках і системі обробки даних використовуються досягнення космічної технології,

завдяки цьому якість роботи не залежить від умов навколишнього середовища і усуває вплив динамічних явищ при русі вагона на точність вимірювань.

Тут вважаємо, що траєкторія руху полюса базового ТРІЕДР колісної пари відстежує досить точно просторову форму залізничної колії.

Траєкторія шляху з урахуванням локальних нерівностей рейкових ниток. Розглядається прямолінійна ділянка залізничної колії довжиною L , де локальні нерівності знаходились за допомогою колієвимірювача з кроком h у вигляді відхилень від прямої лінії координат правої рейки. нехай $L = 600\text{ м}$, $h = 0,1\text{ м}$. Результати вимірювань плану і профілю колії із заданим кроком у вигляді просторової траєкторії з двох проекцій - вертикальної і горизонтальної, представлені на рис. 5.1б., Рис. 5.2.

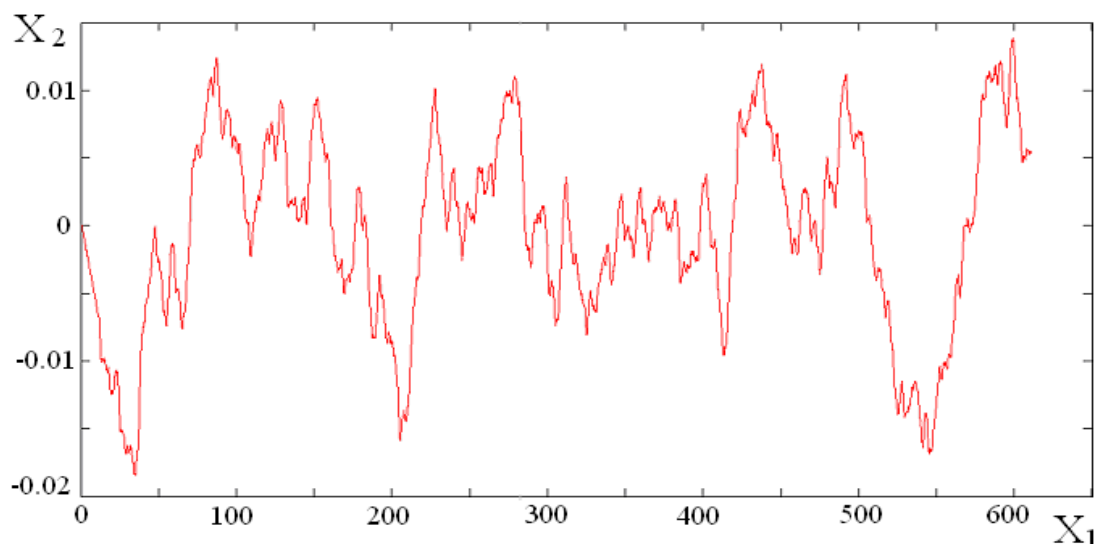


Рис. 5.1б. Горизонтальні поперечні відхилення залізничної колії на заданому прямолінійній ділянці

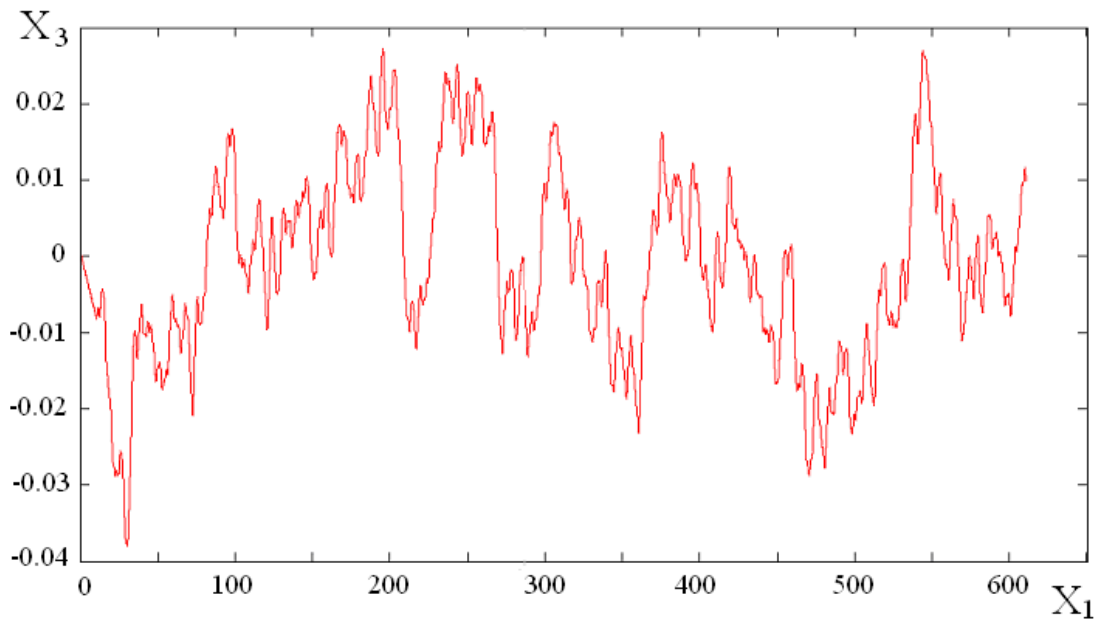


Рис 5.2. Вертикальні відхилення залізничної колії на заданому прямолінійній ділянці

5.5.Оцінка безпечного режиму руху по кінематичним умовам, що визначає відносне розташування поверхні контакту колеса і рейки в плані

У розрахунковому необуреному режимі руху відносне розташування колеса і рейки показано на рис. 5.3. і визначається в інерціальній системі координат $OX_1 X_2 X_3$,

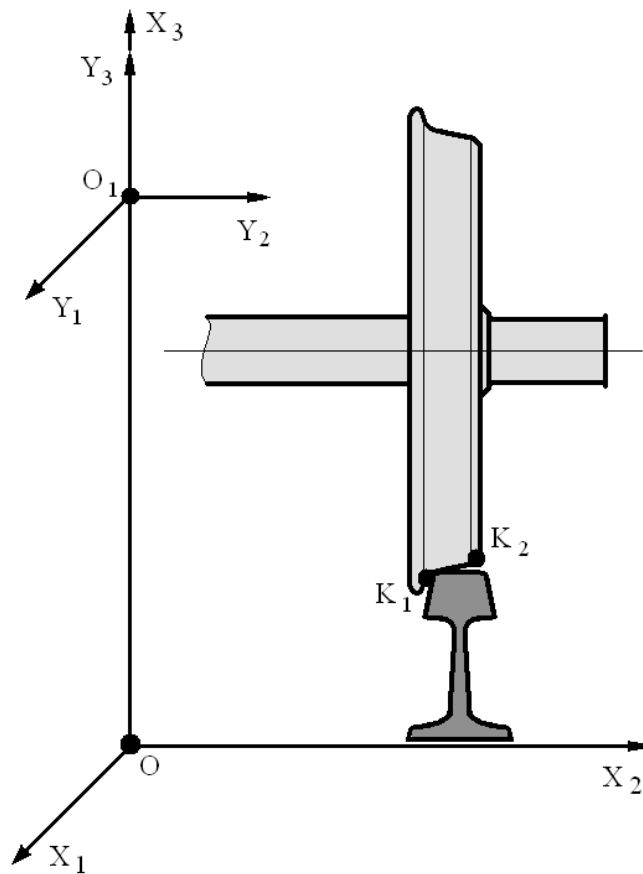


Рис. 5.3. Системи координат і схема не обуреного руху колеса по рейці

де OX_1 - вісь рейкового шляху. Обурений режим руху колеса по рейці показаний на рис. 5.4., Де система координат $O_1Y_1Y_2Y_3$ - пов'язана з колісною парою, в полюсі якої вимірюються лінійні і кутові відхилення в просторі. Обурене положення колеса в інерціальній системі координат визначається перенесенням полюса O_1 в просторі на малі зміщення: $h_1(\tau)$ - поздовжнє, $h_2(\tau)$ - бічне, $h_3(\tau)$ - вертикальне і малим просторовим поворотом колеса з урахуванням качки - $\theta(\tau)$, Галопування - $\varphi(\tau)$, Виляння - $\psi(\tau)$ в залежності від безрозмірного часу τ .

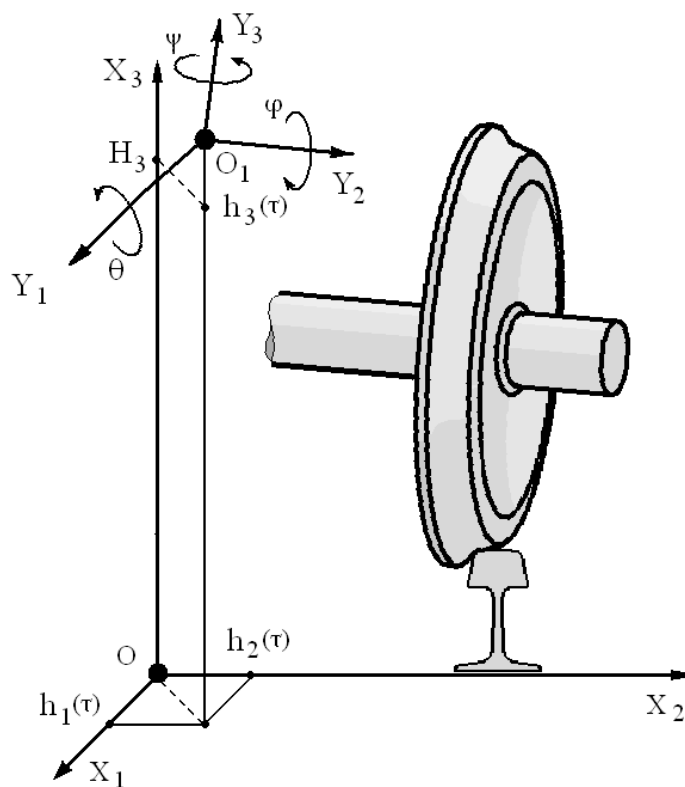


Рис. 5.4. Схема обуреного руху колеса по рейці з урахуванням просторового зміщення і повороту при хитавиці, галопування і виляння.

Вихідні дані вимірювань лінійного і кутового обуреного зміщення і повороту колеса в процесі руху по заданій ділянці шляху довжиною 200 м із швидкістю 100 км / год. Експериментальні дані вимірів плану шляху на даній ділянці, з урахуванням локальних нерівностей певних шляховимірювачем наводяться на рис. 5.5.

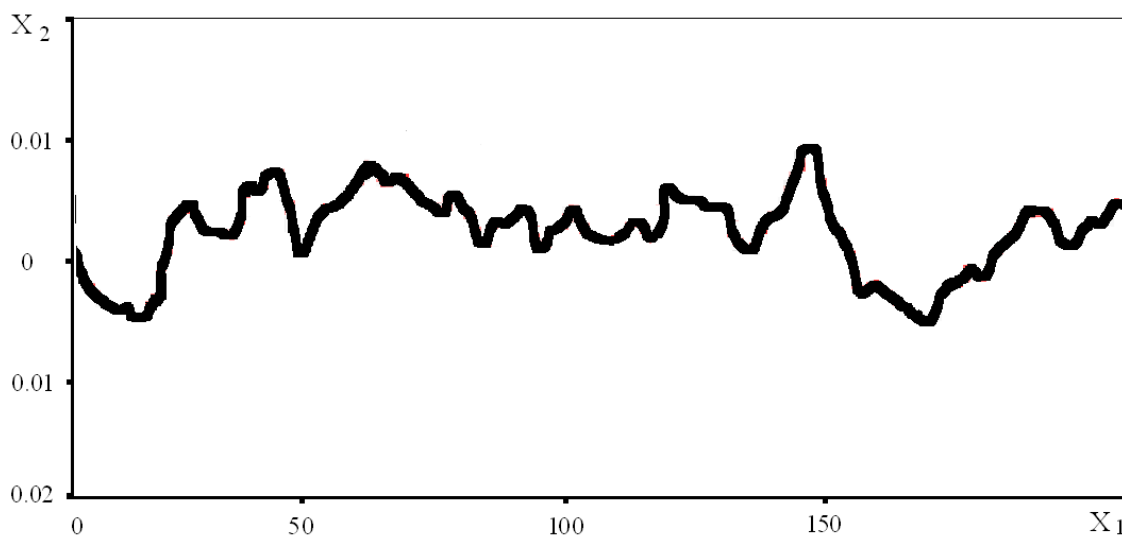


Рис. 5.5. Локальні нерівності колії в плані

Безпечний режим руху залізничного екіпажу визначається умовою, при якій робочі поверхні катання рейки і колеса були б поєднані хоча б в одній точці [22] (рис 5.6.).

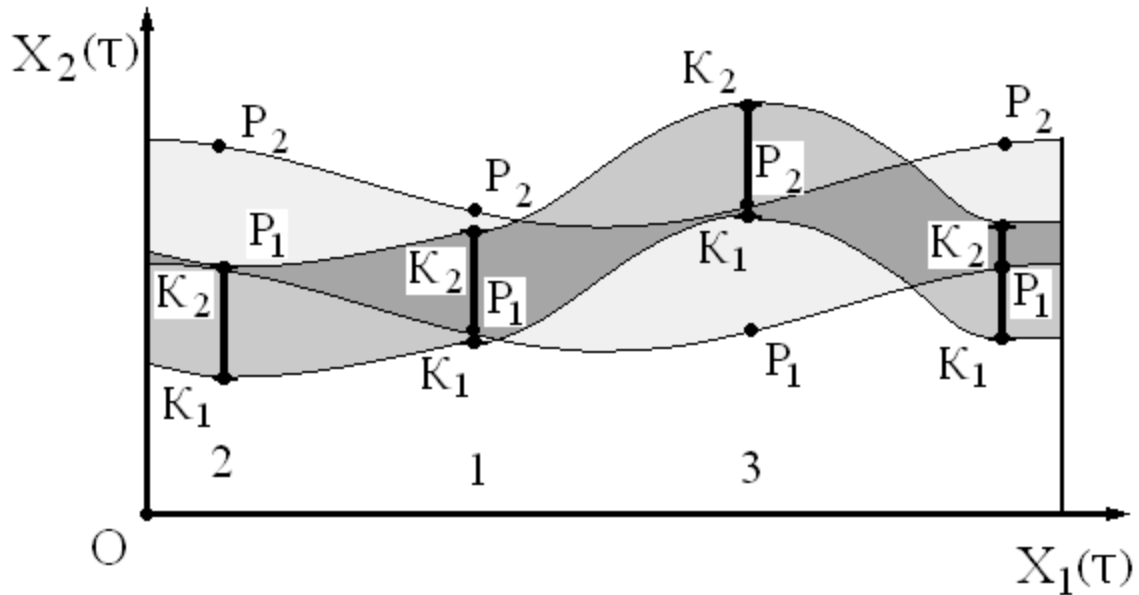


Рис. 5.6. Схема критичних режимів руху колеса по рейці

Ці умови виражаються наступними нерівностями:

$$1. X_2^{K_1}(\tau) \leq X_2^{P_1}(\tau); \quad (5.28)$$

$$2. X_2^{P_1}(\tau) \leq X_2^{K_2}(\tau);$$

$$3. X_2^{K_1}(\tau) \leq X_2^{P_2}(\tau),$$

а критичні режими, відповідні граничним умовам

$$1. X_2^{K_1}(\tau) = X_2^{P_1}(\tau); \quad (5.29)$$

$$2. X_2^{P_1}(\tau) = X_2^{K_2}(\tau);$$

$$3. X_2^{K_1}(\tau) = X_2^{P_2}(\tau),$$

показані на рис. 5.7 .:

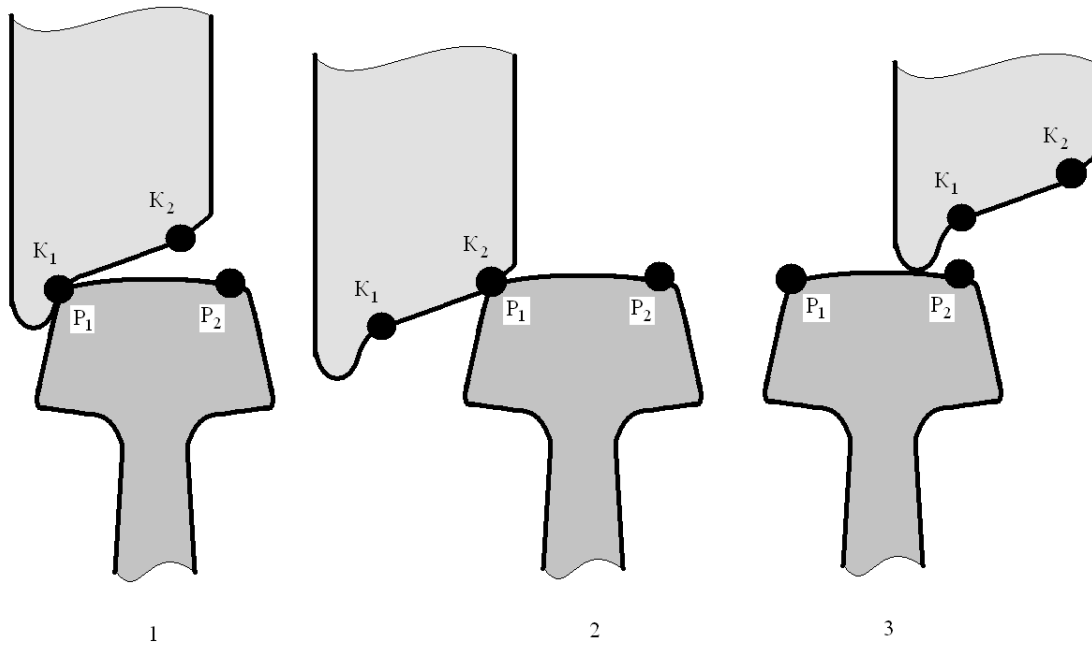


Рис 5.7. Критичні режими руху колеса по рейці:

- 1 - дотик гребеня колеса головки рейки;
- 2 - скидання колеса з головки рейки;
- 3 - сход гребеня колеса з головки рейки.

У зв'язку з цим виникає кінематична завдання про визначення в просторі відрізка робочої поверхні колеса $K_1 K_2$ за вимірюваним зміщення і повороту колісної пари. положення полюса O_1 базового ТРИЕДР, де розташовані чутливі елементи, в інерціальній системі відліку визначається трьома координатами за формулами:

$$X_1^{0_1}(\tau) = L_1 \tau + h_1(\tau), \quad (5.30)$$

$$X_2^{0_1}(\tau) = \frac{1}{2} H_2 + h_2(\tau),$$

$$X_3^{0_1}(\tau) = H_3 + h_3(\tau),$$

де L_1 - довжина розглянутого ділянки залізничної колії; H_2 - номінальне відстань між точками контакту коліс і рейок; H_3 - розрахункова висота розташування чутливих елементів в інерціальній системі відліку; $h_i(\tau)$ ($i=1, 2, 3$) - виміряні зміщення полюса в возмущеному русі колісної пари; τ - безрозмірний час

проходження прямолінійного ділянки шляху заданої довжини L_1 з постійною швидкістю V_∞ . Тут $\tau = \frac{t}{t_k}$ ($0 \leq \tau \leq 1$), де t - поточний момент часу; t_k - кінцевий момент часу, який визначається за формулою $t_k = \frac{L_1}{V_\infty}$.

Малий поворот базового ТРИЕДР колісної пари в возмущеному русі характеризується параметрами Родріга-Гамільтона.

$$\begin{pmatrix} \delta_0^{01} \\ \delta_1^{01} \\ \delta_2^{01} \\ \delta_3^{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{2}\theta(\tau) \\ \frac{1}{2}\varphi(\tau) \\ \frac{1}{2}\psi(\tau) \end{pmatrix}, \quad (5.31)$$

де вимірювані за часом руху кут бічної хитавиці - $\theta(\tau)$, Кут галопування - $\varphi(\tau)$, Кут виляння - $\psi(\tau)$. Тоді координати точок робочої поверхні колеса в інерціальній просторі знаходяться по ідентичним формулам:

$$X_{K_1}(\tau) = X_{0_1}(\tau) + \Delta_{0_1}(\tau) \times {}^t\Delta_{0_1}(\tau) \times Y_{K_1}, \quad (5.32)$$

$$X_{K_2}(\tau) = X_{0_1}(\tau) + \Delta_{0_1}(\tau) \times {}^t\Delta_{0_1}(\tau) \times Y_{K_2},$$

де Y_{K_1} і Y_{K_2} - координати граничних точок колеса в зв'язаній системі відліку, що визначаються конструктивно і постійні в часі.

$$Y_{K_1} = \begin{pmatrix} 0 \\ Y_1^{K_1} \\ Y_2^{K_1} \\ Y_3^{K_1} \end{pmatrix}, \quad Y_{K_2} = \begin{pmatrix} 0 \\ Y_1^{K_2} \\ Y_2^{K_2} \\ Y_3^{K_2} \end{pmatrix}.$$

$\Delta_{0_1}(\tau)$ і ${}^t\Delta_{0_1}(\tau)$ - кватерніонами матриці, складені за параметрами Родріга-Гамільтона, змінним в часі в процесі обуреного руху: