

УДК 623.552
КП
№ держреєстрації 0117U002250
Інв. №

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет (СумДУ)
40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, тел. (0542) 33 41 08

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
д.ф.-м.н., професор

_____ А.М. Черноус
28.12.2017 р.

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
Створення комплексу універсальних моделей для оптимізації старту, польоту та
приземлення реактивних снарядів для реактивних систем залпового вогню
(проміжний)

Начальник НДЧ,
к.ф.-м.н., с.н.с.

Д. І. Курбатов

Керівник НДР,
д.ф.-м.н., проф.

В.В. Калашніков

2017
Рукопис закінчено 21 грудня 2017 року
Результати роботи розглянуто науковою радою, протокол №4 від 28.12.2017 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник,
п.н.с., д.ф.-м.н., проф.

(підпис)

В. В. Калашніков
(розділи 1, 2)

(дата)

Відповідальний виконавець,
с.н.с., к.ф.-м.н, с.н.с.

(підпис)

І. В. Коплик
(реферат, вступ, розділи 1,
2, висновки)

(дата)

Виконавець,
с.н.с., к.ф.-м.н, доц.

(підпис)

О. М. Шийко
(реферат, вступ, розділи 1,
2, висновки)

(дата)

Виконавець,
п.н.с., к.т.н., проф.

(підпис)

А. В. Васильєв
(вступ, розділи 1, 2)

(дата)

Виконавець
н.с., к.т.н.

(підпис)

А. В. Скорик
(підрозділ 2.1)

(дата)

Виконавець
м.н.с., к.т.н.

(підпис)

А. А. Обухов
(підрозділ 2.2)

(дата)

Виконавець
лаборант

(підпис)

О. С. Соколов
(підрозділ 2.1.2)

(дата)

РЕФЕРАТ

Звіт (проміжний) про НДР: 94 с., 1 табл., 28 рис., 9 джерел.

ПУСКОВА УСТАНОВКА, РЕАКТИВНИЙ СНАРЯД, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, РЕАКТИВНА СИСТЕМА ЗАЛПОВОГО ВОГНЮ.

Об'єкт дослідження – процес старту літального апарату з пускової установки. Об'єктом розробки є система диференціальних рівнянь руху складових частин пускової установки та літального апарату.

Мета роботи – розробка математичної моделі спільного руху частин мобільної пускової установки з трубчатими направляючими, змонтованої на базі автомобільного шасі, і снарядів реактивної системи залпового вогню.

Метод дослідження – класичні методи сучасної динаміки, а також методи моделювання.

Створено розрахункову модель гіпотетичної пускової установки реактивної системи залпового вогню. Побудовано математичну модель сумісного руху реактивних снарядів і частин пускової установки реактивної системи залпового вогню під час стартового навантаження, яка враховує взаємодію між реактивними снарядами, пусковою установкою і ґрунтовою основою, а також жорсткостні та масові характеристики елементів конструкції пускової установки під час залпу реактивних снарядів. Розроблено системи диференціальних рівнянь, які описують механічні процеси, що відбуваються при старті реактивних снарядів. Отримана модель динаміки старту реактивної системи залпового вогню з трубчастими направляючими під час залпового пуску реактивних снарядів.

ЗМІСТ

СКРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	6
ВСТУП.....	7
1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РУХУ РЕАКТИВНОГО СНАРЯДА ПО ЖОРСТКИМ ВІДКРИТИМ НАПРЯМНИМ.....	11
1.1 Математична модель руху РС з гладким корпусом по жорстким відкритим напрямним.....	11
1.2 Математична модель руху РС з напрямними поясками по жорстким відкритим напрямним.....	15
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ РС ТА ПРУЖНОЇ ПУ, ЗМОНТОВАНОЇ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ШАСІ	20
2.1 Математичне моделювання руху РС та пружної ПУ, змонтованої на автомобільному шасі, при стрільбі над кабіною	20
2.1.1 Ділянка відносного спокою снаряда на напрямній ПУ	20
2.1.2 Ділянка відносного поступального руху РС по напрямній ПУ.....	36
2.1.3 Ділянка відносного складного руху РС з гладким корпусом по напрямній ПУ	45
2.1.4 Рівняння руху шасі за умови відключення заднього мосту носія ПУ .	50
2.2 Математичне моделювання руху РС та пружної ПУ, змонтованої на автомобільному шасі при стрільбі під курсовим кутом 90^0	52
2.2.1 Ділянка відносного спокою снаряда на напрямній ПУ	52
2.2.2 Ділянка відносного поступального руху РС по напрямній ПУ.....	71
2.2.4 Геометрія мас напрямних ПУ, що використовується в розрахункових моделях	85
2.3 Результати чисельного моделювання	89
ВИСНОВКИ.....	94
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	96

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

- ЛА — літальний апарат;
ПУ — пускова установка;
ПЧ — поворотальна частина;
РС — реактивний снаряд;
РСЗВ — реактивна система залпового вогню;
СЗП — стопорно-замковий пристрій;
ХЧ — хитна частина.

ВСТУП

Актуальність проблеми забезпечення заданих характеристик технічного розсіювання реактивних снарядів (РС) при стрільбі з мобільних пускових установок (ПУ) реактивних систем залпового вогню (РСЗВ) вимагає розробки інженерних методик оцінки динамічних якостей ПУ, під якими розуміють сукупність властивостей ПУ як механічної системи, що визначають її здатність забезпечувати необхідні характеристики розсіювання снарядів при заданих умовах стрільби. Для цього потрібні теоретичні і розрахункові дослідження динаміки старту. Вони потрібні як для визначення початкових збурень, що отримує літальний апарат (ЛА) в момент втрати контакту з ПУ, так і для проектування самої ПУ, так як є основним джерелом інформації про навантаження на елементи ПУ при конструкторській розробці нових зразків озброєння.

При старті ЛА з мобільної ПУ на доданок до статичних навантажень виникають значні додаткові динамічні навантаження на ПУ. Ці навантаження призводять до появи додаткових динамічних напружень в елементах конструкцій ПУ і повинні бути враховані при розрахунках систем ЛА-ПУ на міцність, жорсткість і надійність. Динамічні навантаження призводять до переміщень частин ПУ і, як наслідок, до появи збурень початкових умов старту ЛА. В свою чергу збурення початкових умов старту визначають розкид початкових параметрів активної ділянки руху ЛА, що можуть призвести до суттєвого розкиду положень центру мас ЛА в кінці траєкторії, особливо некерованих, до яких відносяться снаряди РСЗВ. В зв'язку з цим, при розробці нових або модернізації існуючих зразків РСЗВ виникає необхідність створення математичних моделей руху РС як на траєкторії польоту, так і в межах ПУ, а також руху самої ПУ. Останнє особливо стосується мобільних ПУ, що змонтовані на транспортній платформі на зразок автомобільного шасі і являють собою пружньо-інерційні коливні системи, яким притаманні всі особливості коливних систем, зокрема резонансні прояви. Близкість власного періоду

коливань такої ПУ до проміжку часу між пусками снарядів РСЗВ призводить до збільшення збурень траєкторій снарядів і динамічних навантажень на ПУ. І навпаки, відступ частоти пусків від власної частоти коливань ПУ повинен зменшувати збурення початкових умов руху снарядів і, як наслідок, зменшувати збурення траєкторій, а також зменшувати динамічну складову навантажень на ПУ. Слід також відмітити, що по мірі сходу снарядів РСЗВ з ПУ під час залпу, суттєво зменшується маса направляючої ПУ, попередньо завантаженої снарядами, що призводить до зміни власних частот ПУ в порівнянні зі значеннями при початковому завантаженні снарядами. Це приводить до поступового зміщення резонансних частот ПУ під час залпу, очікувано в бік їх збільшення. При цьому зменшується і статична складова навантаження на елементи ПУ, що призводить до зміни положення статичної рівноваги складових частин ПУ. Суттєвий вплив на характеристики розсіювання снарядів чинять і жорсткостні характеристики ґрунтової основи з якої здійснюється стрільба.

В зв'язку з окресленими питаннями, в даній роботі була поставлена задача розробити математичну модель сумісного руху РС та складових частин мобільної пускової установки РСЗВ і на основі отриманої моделі провести чисельні дослідження коливань окремих складових частин ПУ, динамічних реакцій у внутрішніх зв'язках ПУ та кутів вильоту снарядів шляхом чисельного інтегрування на ПЕОМ при різних інтервалах часу між пусками снарядів, значеннях сили затяжки стопорно-замкового пристрою снаряда та жорсткості ґрунтової основи.

Аналіз літературних джерел. Аналіз літератури показав, що в даний час для дослідження процесів, які супроводжують старт ЛА з мобільної ПУ, створюються методи орієнтовані на вирішення питань, пов'язаних з вивченням параметрів руху ЛА та складових частин ПУ під час старту: досліджуються явища безударності сходу ЛА з направляючих, початкові збурення траєкторії, навантаження на ЛА і складові частини ПУ при русі ЛА по направляючим [1].

З позицій динамічного аналізу в механічній системі ЛА-ПУ, змонтованій на автомобільному шасі зазвичай виділяють три тіла, наділених значною масою: шасі, напрямну і ЛА. До складу шасі входить рама автомобіля з розміщеними на ній механізмами підйому і повороту напрямної та кабіна водія [1]. Пружні і демпфуючі властивості підвіски, коліс та ґрунтової основи враховуються відповідними приведеними коефіцієнтами жорсткості та в'язкого тертя. До складу розрахункових моделей коливань колісних машин можуть бути включені автомобільні мости [4,5]. В той же час в розрахункову модель мобільної пускової установки, представлену в [1], автомобільні мости не включені, система ЛА-ПУ представляється як система трьох абсолютно твердих тіл ЛА-направляюча-носій. Подібне спрощення вбачається таким, що впливає на точність розрахунків коливань конструкції ПУ.

Конструкція в цілому і окремі її складові частини (наприклад, ЛА чи направляюча) в залежності від конструктивної схеми можуть розглядатися або ж як система з розподіленими параметрами (з нескінченно великою кількістю ступінів вільності), або ж як система абсолютно жорстких тіл (з кінцевим числом ступінів вільності). В першому випадку математична модель динаміки системи містить диференціальні рівняння в часткових похідних, в другому випадку дослідження динаміки системи ЛА-ПУ на старті потребує рішення системи звичайних диференціальних рівнянь. Розрахункова модель, в якій ЛА, направляюча та носій розглядаються як абсолютно жорсткі тіла, являється найбільш простою. У разі, коли власні частоти коливань для розрахункової моделі з абсолютно жорсткими тілами значно менше перших частот реальної системи, то остання розрахункова модель є виправданою [1]. Коливання складових частин системи ЛА-ПУ можуть розглядатися в продольній площині [2,4,5], або ж досліджуватися як просторові у випадку, коли площина наведення ЛА не співпадає з площинами головних моментів інерції носія [1].

Метою роботи є розробка математичної моделі спільного руху частин мобільної ПУ з трубчатими направляючими, змонтованої на базі

автомобільного шасі, і снарядів РСЗВ, а також проведення за її допомогою чисельного моделювання на ПЕОМ руху частин ПУ і РС при різних інтервалах часу між пусками снарядів, значеннях сили зтяжки стопорно-замкового пристрою снаряда та жорсткості ґрунтової основи. Це дозволяє шляхом чисельного аналізу оцінювати динамічні характеристики ПУ та динамічні навантаження на частини ПУ, а також початкові збурення траєкторії РС при сході снарядів РСЗВ з мобільної ПУ.

1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РУХУ РЕАКТИВНОГО СНАРЯДА ПО ЖОРСТКИМ ВІДКРИТИМ НАПРЯМНИМ

1.1 Математична модель руху РС з гладким корпусом по жорстким відкритим напрямним

Розглядаючи модель руху РС по жорсткій відкритій напрямній, слід виділити дві ділянки цього руху. Перша ділянка – це така, на якій рух снаряда можна вважати поступальним, а друга – ділянка просторового руху. Момент переходу від поступального руху до просторового залежить від конструктивної схеми снаряда, яка буває двох типів.

Якщо снаряд гладкий, тобто не має опорних штифтів або направляючих поясків на корпусі (рис. 1.1), то просторовий рух починається після проходження центром ваги снаряда крайньої правої точки напрямної. На другій фазі руху РС почне повертатися. При цьому точка контакту, навколо якої відбувається обертання снаряда завжди буде на кінці напрямної, що рухається по відношенню до поверхні снаряда.

Для снаряда з опорними вузлами у вигляді направляючих поясків (рис. 1.2), поступальна ділянка руху закінчується тоді, коли передостанній поясок зісковзує з напрямних. В такому разі снаряд має контакт з напрямною в одній точці, яка нерухома відносно снаряда і ковзає вздовж напрямної.

При дослідженнях руху реактивних снарядів в умовах вільного польоту по траєкторії, рівняння обертального руху снаряда, як правило, складаються на підставі теореми про зміну моменту кількості руху відносно центру мас [2]. На відміну від руху по траєкторії, обертальний рух снаряда під час руху по напрямним відбувається при наявності зв'язку з направляючою у вигляді рухомої опорної точки. Тому більш природнім при дослідженні руху снаряда по напрямній було б розглядати обертання снаряда навколо цієї точки.

Наявність просторового руху снаряда призводить до появи кута вильоту.

Крім наявності кута вильоту, після сходу з ПУ снаряд зберігає деякий час наданий йому на ПУ обертальний рух. З метою чисельного дослідження кутів вильоту та кутових швидкостей снаряда після сходу з ПУ, доцільно розглянути спрощену модель руху снаряда по напрямній. Це дасть змогу врахувати найбільш суттєві фактори та прослідкувати їх вплив на значення досліджуваних величин.

Розглянемо модель руху гладкого снаряда по жорсткій відкритій напрямній (рис. 1.1). Рух будемо вважати плоским і таким, що відбувається в вертикальній площині.

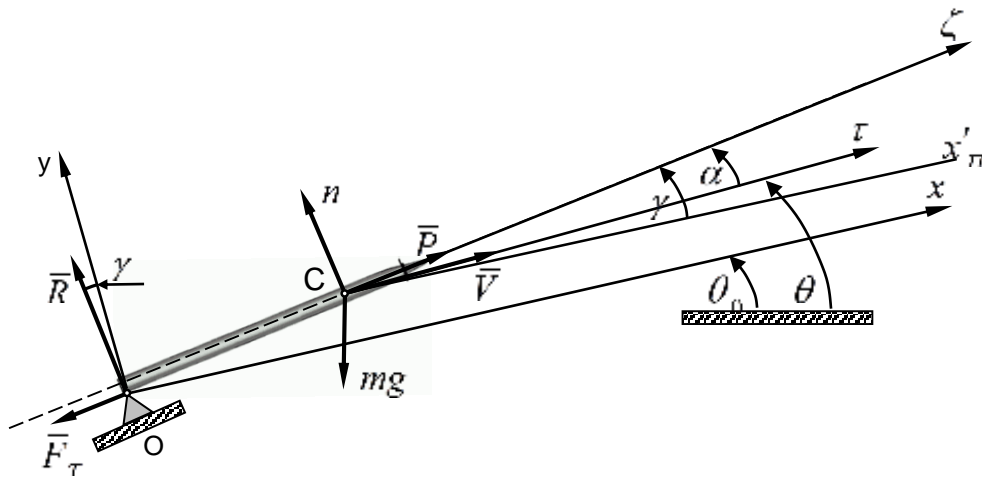


Рисунок 1.1 - Схема руху РС з гладким корпусом по жорсткій відкритій напрямній

Рівняння руху центра мас мають вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{1}{m} \cdot [P \cdot \cos \alpha - mg \cdot \sin \theta - R \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha) - \\ &\quad - P \cdot (\mu \cdot \sin^2 \alpha_{\Pi} + \sin \alpha_{\Pi} \cdot \cos \alpha_{\Pi}) \cdot \cos(\theta - \theta_0)]; \\ \dot{\theta} &= \frac{1}{mV} \cdot [P \cdot \sin \alpha - mg \cdot \cos \theta + R \cdot (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha) - \\ &\quad - P \cdot (\sin \alpha_{\Pi} \cdot \cos \alpha_{\Pi} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{\Pi}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\theta - \theta_0)].\end{aligned}\quad (1.1)$$

Останні складові в правих частинах рівнянь є проекціями реакції гвинтового пазу на дотичну і нормаль до траєкторії руху центра мас снаряда. Гвинтовий паз може використовуватися з метою надання РС обертання після сходу його з ПУ. Детальні пояснення, що до виникнення і обчислення складових реакції та величин, які при цьому використовуються, знаходяться в розділі 2.3.2.

Для визначення динамічної реакції в опорній точці, складемо рівняння руху центра мас в проекціях на вісь y , звідки маємо:

$$R = \frac{(mg \cdot \cos \theta_0 - P \cdot \sin \gamma - P \cdot (\sin \alpha_{\Pi} \cdot \cos \alpha_{\Pi} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{\Pi}) \cdot \sin \varphi + m \cdot \ddot{y}_c)}{\cos \gamma - \mu \cdot \sin \gamma}\quad (1.2)$$

де $\gamma = (\theta - \theta_0 + \alpha)$ – кут вильоту, θ_0 – кут прицілювання, μ – коефіцієнт тертя в системі «РС – напрямна»;

$$\ddot{y}_c = \dot{V} \cdot \sin(\theta - \theta_0) + V \cdot \cos(\theta - \theta_0) \cdot \dot{\theta}\quad (1.3)$$

Тепер розглянемо обертальний рух снаряда. Рівняння зміни моменту кількості руху відносно нерухомої опорної точки O має вигляд [8]:

$$I_c \cdot \dot{\omega} = \sum m_o - M \cdot \text{mod} \left(\bar{R}_c \times \bar{a}_c \right), \quad (1.4)$$

де $\sum m_o$ – додаток моментів діючих сил відносно опорної точки; M – маса снаряда; \bar{a}_c – вектор прискорення центра мас $\omega = \dot{\gamma}$.

Значення моменту прискорення центра мас відносно опорної точки:

$$\text{mod}(\bar{R} \times \bar{a}_c) = x_c \cdot \ddot{y}_c - y_c \cdot \ddot{x}_c,$$

де

$$\ddot{x}_c = \dot{V} \cdot \cos(\theta - \theta_0) + V \cdot (\theta - \theta_0) \cdot \dot{\theta}. \quad (1.5)$$

Так як $\omega = \dot{\gamma} = \dot{\theta} + \dot{\alpha}$, то $\dot{\omega} = \ddot{\theta} + \ddot{\alpha}$.

Додаток моментів діючих сил визначимо залежністю

$$\sum m_o = \sum (x \cdot F_y - y \cdot F_x),$$

де x, y – координати точок прикладення сил; F_x, F_y – значення проекцій сил на вісі координат.

Враховуючи значення останніх величин, зводимо рівняння (1.2) та (1.4) до однієї системи рівнянь, надаючи їм першого порядку шляхом введення проміжної величини $\varepsilon = \dot{\gamma}$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 1. \dot{x}_c = V \cdot \cos(\theta - \theta_0); \\
 2. \dot{y}_c = V \cdot \sin(\theta - \theta_0); \\
 3. \dot{V} = \frac{1}{m} \cdot [P \cdot \cos \alpha - P \cdot (\mu \cdot \sin^2 \alpha_{\Pi} + \sin \alpha_{\Pi} \cdot \cos \alpha_{\Pi}) \cdot \cos(\theta - \theta_0) - \\
 \quad - mg \cdot \sin \theta - R \cdot (\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha)]; \\
 4. \dot{\theta} = \frac{1}{mV} \cdot [P \cdot \sin \alpha - mg \cdot \cos \theta + R (\cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha) - \\
 \quad - P \cdot (\sin \alpha_{\Pi} \cdot \cos \alpha_{\Pi} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{\Pi}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\theta - \theta_0)]; \\
 5. \dot{\varepsilon} = \frac{1}{I_c} \cdot [x_c \cdot (P \cdot \sin \gamma - mg \cdot \cos \theta_0) - y_c \cdot (P \cdot \cos \gamma - mg \cdot \sin \theta_0) - m \cdot (x_c \cdot \ddot{y}_c - y_c \cdot \ddot{x}_c) + \\
 \quad + P \cdot (\sin \alpha_{\Pi} \cdot \cos \alpha_{\Pi} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{\Pi}) \cdot \sin \varphi \cdot l_1]; \\
 6. \dot{\gamma} = \varepsilon.
 \end{array} \right. \quad (1.6)$$

1.2 Математична модель руху РС з напрямними поясками по жорстким відкритим напрямним

Розглянемо модель руху снаряда з напрямними поясками, що зображена на рис. 1.2. Рівняння руху центра мас снаряда мають форму (1.1).

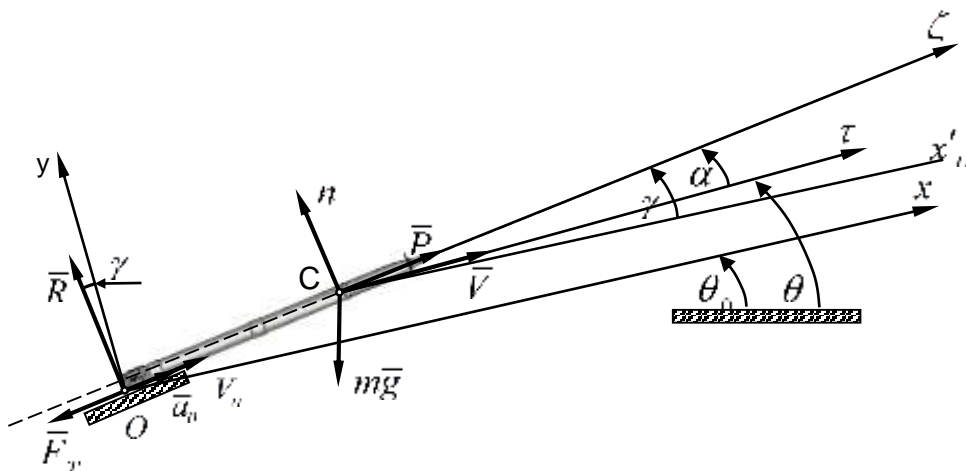


Рисунок 1.2 - Схема руху РС з напрямними поясками по жорсткій відкритій напрямній

Для визначення динамічної реакції, що, як і в попередньому випадку, входить до рівнянь руху центра мас, введемо рухому систему координат $Ox y$ з початком в опорній точці. Ця система координат рухається поступально разом з опорною точкою, її вісь x паралельна направляючій ПУ. Складемо рівняння руху центра мас в проекціях на вісь y (рівняння відносного руху). Так як переносне прискорення \bar{a}_0 перпендикулярне до вісі y , то з цього рівняння маємо :

$$R = mg \cdot \cos \theta_0 - P \cdot \sin \gamma + P \cdot (\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \sin \varphi + m \cdot \ddot{y}_c, \quad (1.7)$$

де \ddot{y}_c має вигляд (1.3).

Складемо рівняння обертального руху РС відносно рухомої опорної точки. Для цього скористуємося теоремою про площинний обертальний рух тіла навколо довільної точки цього тіла [2]. Будемо в нашому випадку мати:

$$I_0 \cdot \dot{\omega} = \sum (x \cdot F_y - y \cdot F_x) - m \cdot (x_c \cdot a_{oy} - y_c \cdot a_{ox}). \quad (1.8)$$

Проекції діючих сил визначаються досить легко, а координати точки їх прикладення (центра мас) в системі O_{xy} $Ox y$ мають такі значення:

$$\begin{aligned} x = x_c &= |OC| \cdot \cos(\gamma + \varphi); \\ y = y_c &= |OC| \cdot \sin(\gamma + \varphi), \end{aligned}$$

де $\varphi = \arctg \frac{r_m}{l_c}$; $|OC| = \sqrt{l_c^2 + r_m^2}$; l_c – відстань від опорної точки до площини, на якій знаходиться центр мас; r_m – радіус міделя снаряда (рис. 1.3).

Знайдемо проекції прискорення опорної точки на вісі x та y . Очевидно, що $a_{oy} = 0$ (рис. 1.2).

$$a_{ox} = a_{cx} - \ddot{x}_c,$$

де проекція абсолютного прискорення центра мас a_{cx} визначається залежністю (1.5), а проекцію відносного прискорення отримаємо, двічі диференціюючи за часом вираз для x_c .

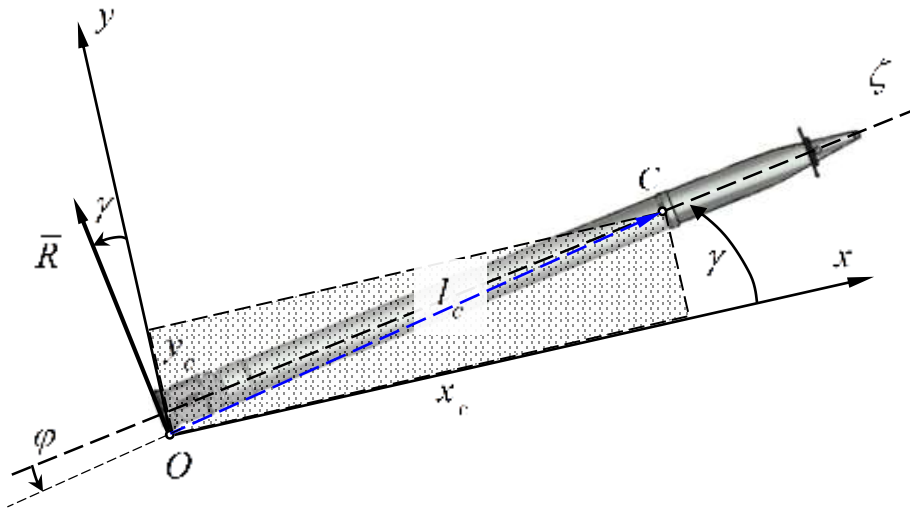


Рисунок 1.3 - Геометричні параметри руху снаряда

В такому разі

$$\ddot{x}_c = -|OC| \cdot [\cos(\gamma + \varphi) \cdot \dot{\gamma}^2 + \sin(\gamma + \varphi) \cdot \ddot{\gamma}]$$

Підставимо в рівняння (1.8) знайдені складові і поєднуючи його в одну систему рівнянь з рівняннями руху центра мас РС, отримуємо наступну систему рівнянь першого порядку (проміжна величина ε):

$$\left\{ \begin{array}{l} 1. \dot{x}_{nc} = V \cdot \cos(\theta - \theta_0); \\ 2. \dot{y}_{nc} = V \cdot \sin(\theta - \theta_0); \\ 3. \dot{V} = \frac{1}{m} \cdot \{P \cdot \cos \alpha - P \cdot (\mu \cdot \sin^2 \alpha_{II} + \sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II}) \cdot \cos(\theta - \theta_0) - \\ \quad - mg \cdot \sin \theta + R \cdot [(\sin \theta - \theta_0) - \mu \cdot \cos(\theta - \theta_0)]\}; \\ 4. \dot{\theta} = \frac{1}{mV} \cdot \{P \cdot \sin \alpha - P \cdot (\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\theta - \theta_0) - \\ \quad - mg \cdot \cos \theta + R \cdot [(\cos \theta - \theta_0) + \mu \cdot \sin(\theta - \theta_0)]\}; \\ 5. \dot{\varepsilon} = \frac{1}{I_o} \cdot [x_c \cdot (P \cdot \sin \gamma - mg \cdot \cos \theta_0) - y_c \cdot (P \cdot \cos \gamma - mg \cdot \sin \theta_0) + m \cdot y_c \cdot a_{ox}]; \\ 6. \dot{y} = \varepsilon. \end{array} \right. \quad (1.9)$$

де x_{nc} , y_{nc} – координати центра мас снаряда в нерухомій системі координат, початок якої знаходиться в кінцевій точці направляючої (на дульному зрізі), вісь x'_{II} спрямована вздовж направляючої, вісь y'_{II} спрямована вгору перпендикулярно до x'_{II} .

В системах рівнянь (1.6) та (1.9) рівняння відносно $\dot{\theta}$ має цю ж саму величину в правій частині через залежність (1.3). Після приведення рівняння з системи (1.6) до канонічного вигляду, воно приймає таку форму запису:

$$\dot{\theta} = \frac{\left[A + (B + mC) \cdot \frac{\beta}{\beta_1} \right]}{\left(mV - mD \cdot \frac{\beta}{\beta_1} \right)} \quad (1.10)$$

де

$$\begin{aligned} A &= P \cdot \sin \alpha - P \cdot (\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\theta - \theta_0) - mg \cdot \cos \theta; \\ B &= mg \cdot \cos \theta_0 - P \cdot \sin \gamma; \quad C = \dot{V} \cdot \sin(\theta - \theta_0); \quad D = V \cdot \cos(\theta - \theta_0); \\ \beta &= \cos \alpha - \mu \cdot \sin \alpha; \quad \beta_1 = \cos \gamma - \mu \cdot \sin \gamma. \end{aligned}$$

Приводячи рівняння для $\dot{\theta}$ з системи (1.9) до канонічного вигляду, маємо:

$$\dot{\theta} = \frac{[A + (B + mC) \cdot \beta]}{(mV - mD \cdot \beta)}, \quad (1.11)$$

де $\beta = \cos(\theta - \theta_0) + \mu \cdot \sin(\theta - \theta_0)$; A, B, C, D мають попередні значення.

Форми запису систем рівнянь (1.6) та (1.9) дозволяють інтегрувати їх чисельно, наприклад за допомогою методу Рунге-Кутта, отримуючи при цьому значення параметрів руху на протязі всього руху снаряда в межах ПУ, визначити значення кута вильоту та кутову швидкість снаряда в момент його сходу з ПУ.

2 МАТАМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ РС ТА ПРУЖНОЇ ПУ, ЗМОНТОВАНОЇ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ШАСІ

2.1 Математичне моделювання руху РС та пружної ПУ, змонтованої на автомобільному шасі, при стрільбі над кабіною

Розглядаючи старт некерованого РС з мобільної ПУ типу БМ-21 слід відмітити три ділянки руху. Перша ділянка – ділянка відносного спокою снаряда на напрямній. На цій ділянці снаряд утримується на напрямній завдяки дії стопорно-замкового пристрою (СЗП) до тих пір, поки сила тяги двигуна, зростаючи від нуля, не досягне значення відповідної сили форсування затяжки стопора. Друга ділянка – ділянка відносного поступального руху, яка потім переходить в третю ділянку – ділянку просторового руху РС по напрямній.

2.1.1 Ділянка відносного спокою снаряда на напрямній ПУ

На першій ділянці сила тяги двигуна передається через стопор на напрямну, а потім на шасі автомобіля, що приводить до руху зазначених складових ПУ. З метою розробки математичної моделі руху системи снаряд – ПУ, звернемося до розрахункових схем, що зображені на рис 2.1 та рис. 2.2. Ця схема включає в себе три складові: снаряд, напрямну та носій, що складається з шасі та автомобільних мостів. При цьому снаряд і напрямну будемо вважати одним тілом, з'єднаним з шасі внутрішнім зв'язком.

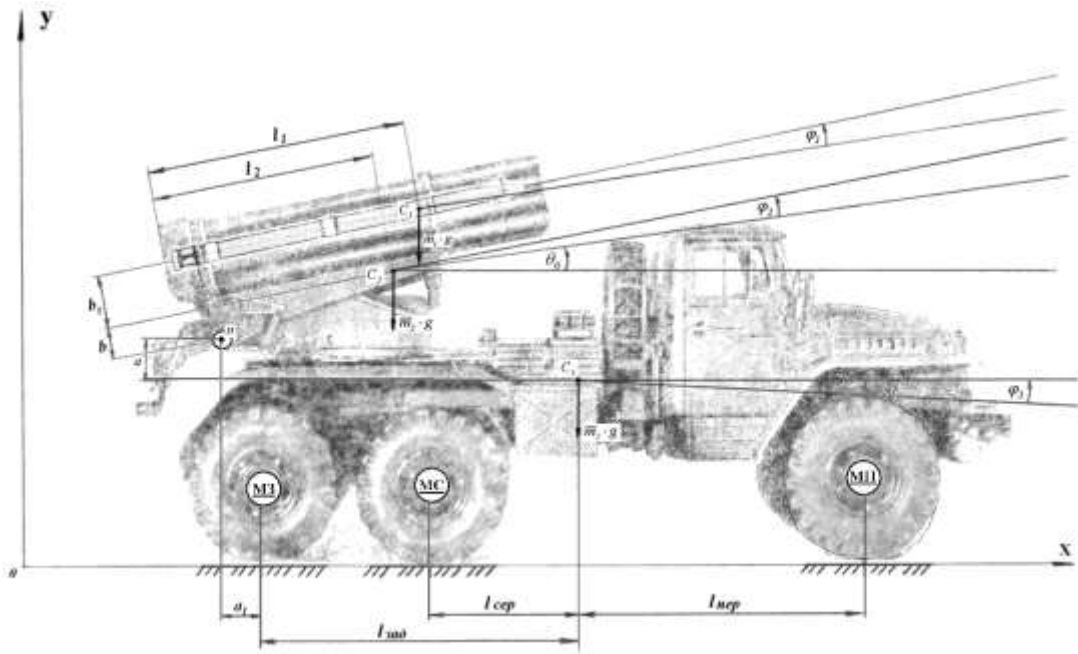


Рисунок 2. 1 - Геометричні параметри системи РС – ПУ при відносному спокої снаряда на напрямній.

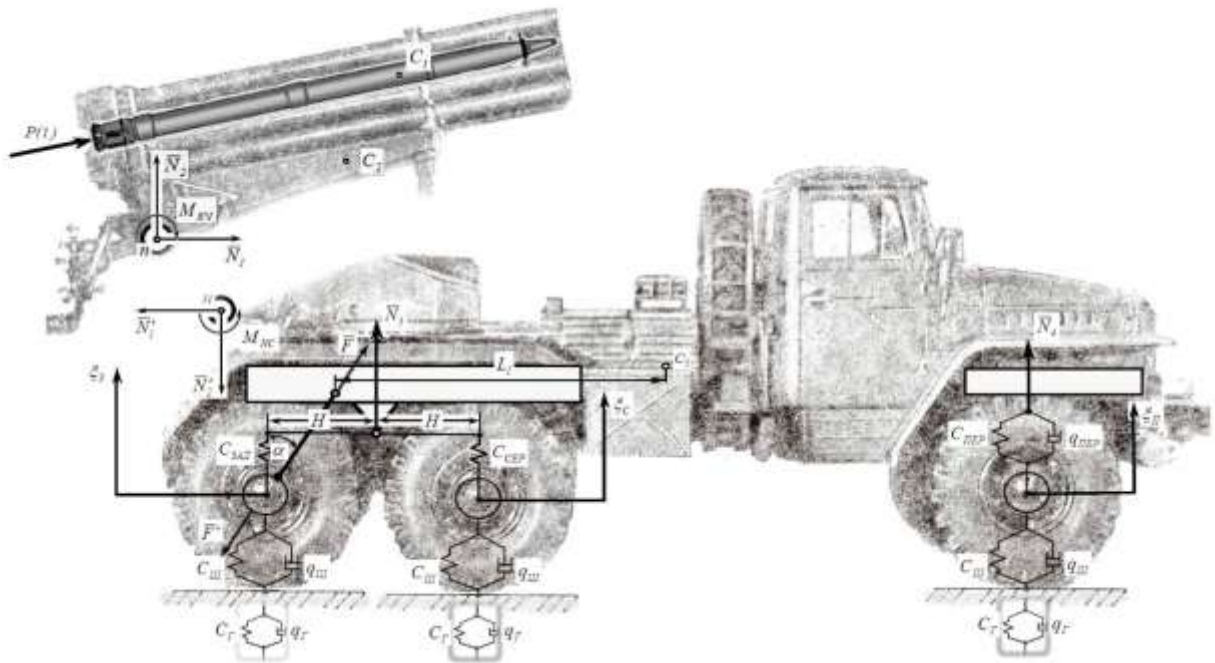


Рисунок 2.2 - Розрахункова схема системи РС – ПУ при відносному спокої снаряда на напрямній.

Складання рівнянь руху почнемо з рівняння обертального руху напрямної, спорядженої снарядами. При складанні цього рівняння і послідуєчих рівнянь руху складових частин ПУ відлік параметрів руху будемо вести з положення статичної рівноваги кожної з складових пружно-інерційної системи «снаряд – ПУ». При цьому будемо вважати, що між напрямною та шасі ПУ існує шарнірний зв'язок, в якому, крім складових \vec{N}_1 та \vec{N}_2 зосередженої реакції, виникає пружньо-демпфуючий момент $M_{\chi\chi}$ при кутовій жорсткості з'єднання C_{κ} та коефіцієнті кутового демпфування q_{κ} . Еквівалентні жорсткість та демпфірування передньої підвіски і пневматики передніх коліс автомобіля у вертикальному напрямку представлені коефіцієнтами жорсткості і опору $C_{пер}$ та $q_{пер}$, $C_{ш}$ та $q_{ш}$ відповідно. Горизонтальна жорсткість пневматики визначається коефіцієнтами жорсткості $C_{ГШ}$. Вертикальна еквівалентна жорсткість та демпфірування підвісок середніх та задніх коліс і їх пневматики визначаються коефіцієнтами жорсткості та демпфування $C_{сер}$, $C_{зад}$, $C_{ш}$ та $q_{ш}$, коефіцієнти жорсткості та демпфірування ґрунту – $C_{ГР}$, $q_{ГР}$.

Необхідні для математичного моделювання розміри ПУ вказані на рис. 2.1. Параметри руху системи такі: абсолютні кути повороту снаряда та напрямної φ_1 і φ_2 ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$); абсолютний кут повороту шасі φ_3 ; вертикальні координати $y^{(1)}$, $y^{(2)}$ та y_c відповідно центрів мас снаряда, напрямної та їх загального центра мас; $x^{(1)}$, $x^{(2)}$ та x_c – їх горизонтальні координати; $x^{(3)}$ та $y^{(3)}$ – горизонтальна та вертикальна координата центра мас шасі. Вісь x нерухомої системи координат $\{x, y\}$ – горизонтальна, вісь y – вертикальна.

Як вже відмічалось, відлік всіх параметрів ведеться із положення статичної рівноваги. При цьому сили тяжіння у рівняння руху не ввійдуть. Положення статичної рівноваги відповідає встановленому куту прицілювання θ_0 . Рівняння обертального руху системи «снаряд–напрямна» як одного твердого тіла запишемо по відношенню до їх загального центра мас у вигляді:

$$I_c \cdot \ddot{\varphi} = \sum_i M_{ic}, \quad (2.1)$$

де I_c – момент інерції системи (сукупності) тіл «снаряд–напрямна з рештою снарядів» відносно їх загального центра мас, а праворуч – додатак моментів зовнішніх сил, що діють на цю систему, $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$.

До числа зовнішніх сил відносяться сила тяги \vec{P} , складові реакції \vec{N}_1 та \vec{N}_2 , пружньо-демпфіруючий момент $M_{\hat{E} \times}$. Моменти зовнішніх сил відносно центра мас системи «снаряд–напрямна з рештою снарядів» знайдемо координатним способом за допомогою системи осей системи $\{\tilde{N}, x, y\}$ (рис. 2.3). Вісі x та y цієї системи паралельні осям нерухомої стартової системи координат $\{O, x, y\}$, що зображена на рис. 2.1 та мають свій початок в положенні C статичної рівноваги центра мас системи «снаряд–напрямна».

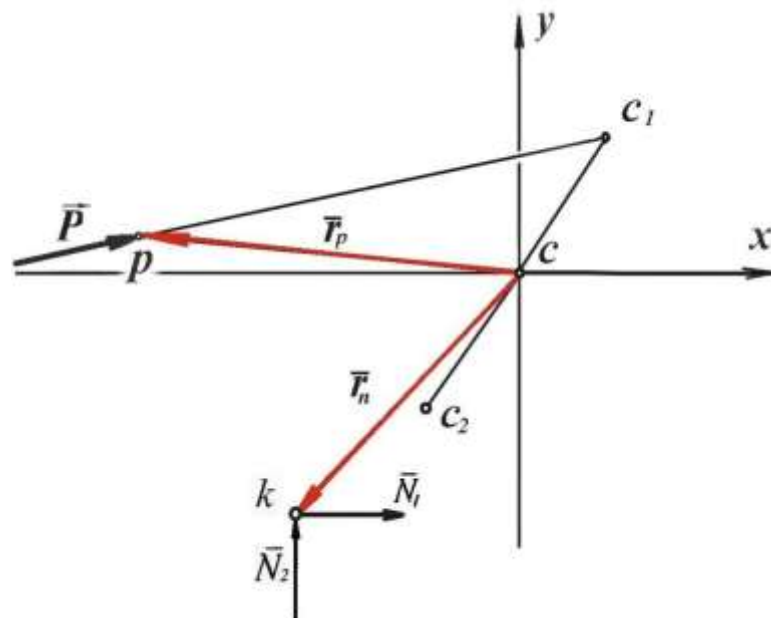


Рисунок 2.3 - До визначення моментів сил, діючих на систему снаряд –
напрямна

Моменти визначимо за залежністю:

$$M_{ic} = x_i \cdot F_{y_i} - y_i \cdot F_{x_i}, \quad (2.2)$$

де x_i, y_i – координати точок прикладених сил; F_{x_i}, F_{y_i} – проекції сил на вісі координат $\{\tilde{N}, x, y\}$.

Складемо таблицю проекцій та координат точок прикладення сил. В таблиці наводяться значення проекцій та вказані номери формул, які в подальшому будуть наведені (табл.2.1).

Таблиця 2.1 - Проекції сил та координати точок їх прикладення

Сили	Проекції сил на вісі		Координати точок прикладання	
	x	y	x	y
P	$P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi)$	$P \cdot \sin(\theta_0 + \varphi)$	ф. 2.14	ф. 2.14
N_1	N_1	0	ф. 2.15	ф. 2.15
N_2	0	N_2	ф. 2.15	ф. 2.15

З метою знаходження координат точок прикладення сил в системі координат $\{\tilde{N}, x, y\}$, спочатку знайдемо положення центра мас системи «снаряд–напрямна». Для цього використаємо систему координат $\{\tilde{N}_1, x_1, y_1\}$ з початком в точці C_1 – центрі мас нерухомого відносно напрямної снаряда (рис. 2.4). Координати x_1, y_1 центра мас снаряда і напрямної в цій системі мають наступні значення.

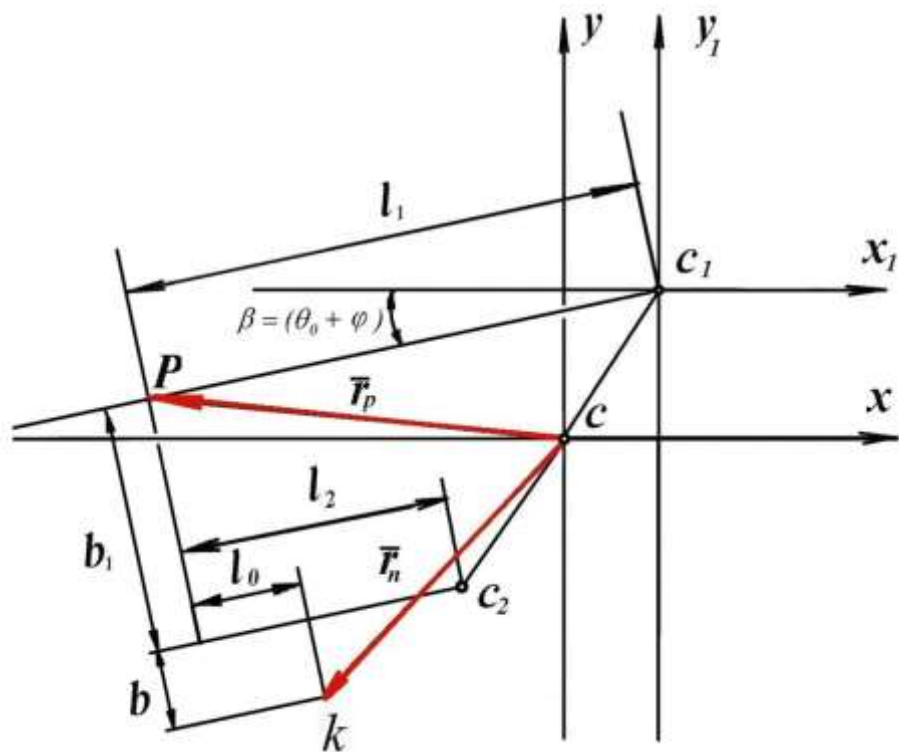


Рисунок 2.4 - До визначення положення центра мас системи РС – напрямна

Координати центра мас снаряда: $x_1^{(1)} = 0$, $y_1^{(1)} = 0$.

Координати центра мас напрямної:

$$\begin{aligned}
 x_1^{(2)} &= -l_1 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + b_1 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + l_2 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) = \\
 &= -(l_1 - l_2) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + b_1 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi); \\
 y_1^{(2)} &= -l_1 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - b_1 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + l_2 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) = \\
 &= -(l_1 - l_2) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - b_1 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi).
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

За відомими залежностями координати x_1, y_1 центра мас системи «снаряд – напрямна» мають значення:

$$x_1^{(c)} = \frac{m_1 \cdot x_1^{(1)} + m_2 \cdot x_1^{(2)}}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 \cdot x_1^{(2)}}{m_1 + m_2};$$

$$y_1^{(c)} = \frac{m_1 \cdot y_1^{(1)} + m_2 \cdot y_1^{(2)}}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 \cdot y_1^{(2)}}{m_1 + m_2};$$

де m_1, m_2 – відповідно маси снаряда та напрямної з рештою снарядів.

Тепер знаходимо координати точок прикладення сил в системі вісів $\{\tilde{N}, x, y\}$ за допомогою рис.2.4. Координати точки прикладення сили тяги, що знаходиться на зрізі сопла двигуна мають такі значення:

$$\begin{aligned} x_{\tilde{p}} = x_p &= -l_1 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - x_1^{(c)} \\ y_{\tilde{p}} = y_p &= -l_1 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - y_1^{(c)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Координати точки прикладення складових реакції шарнірного з'єднання:

$$\begin{aligned} x_{\tilde{N}_1, \tilde{N}_2} = x_k &= x_p + b_l \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + l_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi); \\ y_{\tilde{N}_1, \tilde{N}_2} = y_k &= y_p - b_l \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + l_0 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi); \end{aligned} \quad (2.5)$$

Пружньо-демпфуючий момент в шарнірному з'єднанні, що діє на напрямну, знайдемо за залежністю:

$$M_{xч} = -C_k \cdot (\varphi - \varphi_3) - q_k \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3).$$

Додаток моментів сил, що складає праву частину рівняння (2.1):

$$\sum_i M_{ic} = x_p P \cos(\theta_0 + \varphi) - y_p P \sin(\theta_0 + \varphi) - y_k N_1 + x_k N_2 - C_k (\varphi - \varphi_3) - q_k (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3),$$

а саме рівняння має вигляд:

$$I_c \cdot \ddot{\varphi} = P \cdot [x_p \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - y_p \cdot \sin(\theta_0 + \varphi)] - \\ - y_k \cdot N_1 + x_k \cdot N_2 - C_k \cdot (\varphi - \varphi_3) - q_k \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3). \quad (2.6)$$

Для знаходження складових N_1 та N_2 реакції внутрішньої в'язі запишемо рівняння руху центра мас системи «снаряд – напрямна» в системі вісів $\{\tilde{N}, x, y\}$ у вигляді

$$(m_1 + m_2) \cdot \ddot{x}_c = \sum_i F_{ix}; \\ (m_1 + m_2) \cdot \ddot{y}_c = \sum_i F_{iy},$$

де m_1 – маса снаряда; m_2 – маса напрямної з рештою снарядів, $\sum_i F_{ix}$ – додаток проєкцій зовнішніх сил, що діють на систему тіл «снаряд–напрямна», на вісь x ; $\sum_i F_{iy}$ – додаток проєкцій цих сил на вісь y . Зовнішніми силами при цьому, як вже вказувалося, будуть: реакції \vec{N}_1 та \vec{N}_2 , сила тяги двигуна \vec{P} .

Рівняння руху в напрямку вісі x має вигляд:

$$(m_1 + m_2) \cdot \ddot{x}_c = P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + N_1, \quad (2.7)$$

де $(m_1 + m_2) \cdot \ddot{x}_c = m_1 \cdot \ddot{x}^{(1)} + m_2 \cdot \ddot{x}^{(2)}$

$x^{(1)}$ – координата x центра мас снаряда; $x^{(2)}$ – координата x центра мас напрямної.

Складемо рівняння в'язів, користуючись рис. 2.1.

$$x^{(1)} = x^{(3)} - (l_{\text{зад}} + a_1) \cdot (b_1 + b) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + (l_1 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi);$$

$$x^{(2)} = x^{(3)} - (l_{\text{зад}} + a_1) \cdot b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + (l_2 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi).$$

Двічі продиференціювавши за часом отримані рівняння в'язів, будемо мати:

$$\ddot{x}^{(1)} = \ddot{x}^{(3)} - \ddot{\varphi} \cdot [(b_1 + b) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_1 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi)] +$$

$$+ \dot{\varphi}^2 \cdot [(b_1 + b_2) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - (l_1 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi)];$$

$$\ddot{x}^{(2)} = \ddot{x}^{(3)} - \ddot{\varphi} \cdot [b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_2 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi)] +$$

$$+ \dot{\varphi}^2 \cdot [b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - (l_2 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi)];$$

або ж:

$$\begin{cases} \ddot{x}^{(1)} = \ddot{x}_3 - \ddot{\varphi} \cdot B + \dot{\varphi}^2 \cdot A \\ \ddot{x}^{(2)} = \ddot{x}_3 - \ddot{\varphi} \cdot D + \dot{\varphi}^2 \cdot C \end{cases} \quad (2.8)$$

де

$$A = (b_1 + b) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - (l_1 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi);$$

$$B = (b_1 + b) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_1 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi);$$

$$C = b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - (l_2 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi);$$

$$D = b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_2 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi).$$

Для знаходження $\ddot{x}^{(3)}$ запишемо рівняння руху центра мас шасі з положення його статичної рівноваги в проєкціях на вісь x , що паралельна вісі x системи $\{Oxy\}$ та має початок в статичному положенні центра мас шасі:

$$m_3 \cdot \ddot{x}^{(3)} = -N_1 - 6C_{\text{гш}} \cdot x^{(3)}, \quad (2.9)$$

де $C_{\text{гш}}$ – коефіцієнт горизонтальної жорсткості колеса .

З рівняння (2.9) знаходимо:

$$\ddot{x}^{(3)} = \frac{1}{m_3} \cdot (-N_1 - 6C_{\Gamma} \cdot x^{(3)}), \quad (2.10)$$

З рівнянь (2.7) маємо:

$$m_1 \cdot \ddot{x}^{(1)} + m_2 \cdot \ddot{x}^{(2)} = P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + N_1,$$

або ж, враховуючи (2.8)

$$\begin{aligned} \ddot{x}^{(3)} \cdot (m_1 + m_2) + (-m_1 \cdot B - m_2 \cdot D) \cdot \ddot{\varphi} + (m_1 \cdot A + m_2 \cdot C) \cdot \dot{\varphi}^2 = \\ = P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + N_1. \end{aligned}$$

Підставляючи сюди значення (2.10) для $\ddot{x}^{(3)}$, будемо мати:

$$\begin{aligned} \frac{m_1 + m_2}{m_3} (-N_1 - 6C_{\Gamma} \cdot x^{(3)}) - (m_1 \cdot B + m_2 \cdot D) \cdot \ddot{\varphi} + (m_1 \cdot A + \\ + m_2 \cdot C) \cdot \dot{\varphi}^2 = P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + N_1, \end{aligned}$$

звідки

$$\begin{aligned} N_1 = \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3} [(m_1 \cdot A + m_2 \cdot C) \cdot \dot{\varphi}^2 - (m_1 \cdot B + m_2 \cdot D) \cdot \ddot{\varphi} - \\ - P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - \frac{m_1 + m_2}{m_3} \cdot 6C_{\Gamma} \cdot x^{(3)}]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Рівняння руху центра мас системи «снаряд–напрямна» в напрямку вісі y буде мати вигляд:

$$(m_1 + m_2) \cdot \ddot{y}_c = P(t) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + N_2, \quad (2.12)$$

де у відповідності з формулою для координат центра мас

$$(m_1 + m_2) \cdot \ddot{y}_c = m_1 \cdot \ddot{y}^{(1)} + m_2 \cdot \ddot{y}^{(2)},$$

$y^{(1)}$ – координата у центра мас снаряда, а $y^{(2)}$ – центра мас напрямної.

Рівняння в'язів, що пов'язують координати центрів мас снаряда і напрямної з координатою $y^{(3)}$ центра мас шасі мають вигляд (рис. 2.1):

$$y^{(1)} = y^{(3)} + a - \varphi_3 \cdot (l_{зад} + a_1) + (b + b_1) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_1 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi);$$

$$y^{(2)} = y^{(3)} + a - \varphi_3 \cdot (l_{зад} + a_1) + b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_2 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi).$$

Двічі продиференціюємо за часом і отримаємо:

$$\begin{aligned} \ddot{y}^{(1)} &= \ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} + a_1) - \ddot{\varphi} \cdot [(b + b_1) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - (l_1 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi)] - \\ &\quad - \dot{\varphi}^2 \cdot [(b + b_1) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_1 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi)]; \\ \ddot{y}^{(2)} &= \ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} + a_1) - \ddot{\varphi} \cdot [b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - (l_2 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi)] - \\ &\quad - \dot{\varphi}^2 \cdot [b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_2 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi)], \end{aligned}$$

або ж

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y}^{(1)} &= \ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} + a_1) - \ddot{\varphi} \cdot A - \dot{\varphi}^2 \cdot B \\ \ddot{y}^{(2)} &= \ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} + a_1) - \ddot{\varphi} \cdot C - \dot{\varphi}^2 \cdot D \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

де A, B, C, D мають попередні значення, що задані залежністю (2.8).

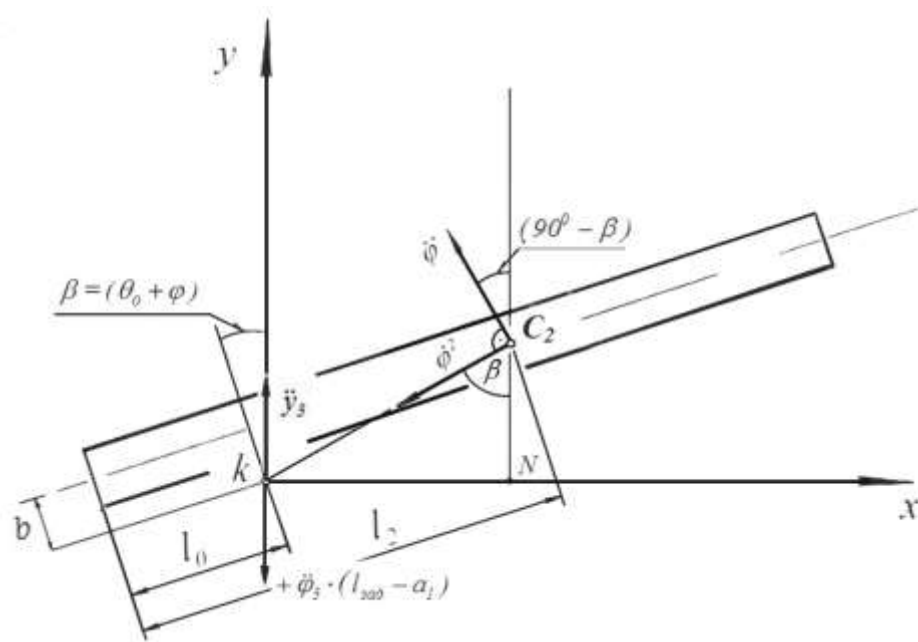


Рисунок 2.5 - До визначення абсолютного прискорення центра мас напрямної

Те, що залежності (2.13) мають місце, можна підтвердити, отримавши залежність, наприклад для $\ddot{y}^{(2)}$, дещо іншим шляхом. Для цього розглянемо рис. 2.5. В системі координат $\{k, x, y\}$, що рухається поступально разом з точкою з'єднання шасі та напрямної, напрямна зі снарядом буде мати кутову швидкість $\dot{\varphi}$ і кутове прискорення $\ddot{\varphi}$. Це буде давати відповідні складові відносного прискорення точки центру мас напрямної C_2 , що зображені на рисунку. Додавши до них складові переносного прискорення в точці k , знайдемо додаток проєкцій всіх складових абсолютного прискорення точки C_2 на вісь y , тобто $\ddot{y}^{(2)}$:

$$\ddot{y}^{(2)} = \ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{\text{зад}} + a_1) - \dot{\varphi}^2 \cdot (KC_2) \cdot \cos\beta + \ddot{\varphi} \cdot (KC_2) \cdot \sin\beta.$$

В свою чергу:

$$\begin{aligned}
 KC_2 \cdot \sin\beta &= KN = -b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + (l_2 - l_0) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) = -C; \\
 KC_2 \cdot \cos\beta &= C_2N = b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + (l_2 - l_0) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) = D.
 \end{aligned}$$

В такому випадку

$$\ddot{y}^{(2)} = \ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} + a_1) - \ddot{\varphi} \cdot C - \dot{\varphi}^2 \cdot D,$$

що співпадає з (2.13).

Візьмемо рівняння (2.12) та підставимо до нього вирази (2.13). В результаті чого будемо мати:

$$\begin{aligned}
 (m_1 + m_2) [\ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 (l_{зад} + a_1)] - \ddot{\varphi} (m_1 A + m_2 C) - \dot{\varphi}^2 (m_1 B + m_2 D) = \\
 = P \sin(\theta_0 + \varphi) + N_2.
 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Тепер запишемо рівняння руху центра мас шасі з положення його статичної рівноваги в проєкціях на вісь y , що паралельна вісі y системи осей $\{Oxy\}$ та має початок в статичному положенні центра мас шасі:

$$m_3 \cdot \ddot{y}^{(3)} = -N_2 + N_3 + N_4 \quad (2.15)$$

Більш детально запишемо діючі на шасі сили. Сумарна сила, що діє з боку передньої підвіски:

$$N_4 = -2C_{пер} \cdot [\ddot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot l_{пер} - \dot{\xi}_{пер}] - 2q_{пер} \cdot [\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot l_{пер} - \dot{\xi}_{пер}].$$

Сила, що діє з боку задньої підвіски:

$$\begin{aligned} N_3 &= -2 \cdot (2C_{зад}) \cdot [y^{(3)} - \varphi_3 \cdot (l_{зад} - H) - \xi_{зад}] = \\ &= 4C_{зад} \cdot [-y^{(3)} + \varphi_3 \cdot (l_{зад} - H) + \xi_{зад}]. \end{aligned}$$

В наведених виразах $\xi_{пер}, \xi_{зад}$ – вертикальні переміщення (координати) заднього та переднього мостів відносно положень їх статичної рівноваги.

На рис. 2.2 та в виразах для сил $C_{пер}, C_{зад}, q_{пер}$ – коефіцієнти жорсткості передньої і задньої підвісок та коефіцієнт опору передньої підвіски.

Рівняння руху (2.15) з врахуванням виразів для сил запишемо таким чином:

$$\begin{aligned} m_3 \cdot \ddot{y}^{(3)} &= -N_2 - C_1 \cdot y^{(3)} - C_2 \cdot \varphi_3 + C_3 \cdot \xi_{зад} + \\ &+ C_4 \cdot \xi_{пер} - Q_1 \cdot \dot{y}^{(3)} - Q_2 \cdot \dot{\varphi}_3 + Q_3 \cdot \dot{\xi}_{пер}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

де

$$\begin{aligned} C_1 &= 2C_{пер} + 4C_{зад}; \quad C_2 = 2C_{пер} \cdot l_{пер} - 4C_{зад} \cdot (l_{зад} - H); \quad C_3 = 4C_{зад}; \quad C_4 = 2C_{пер}; \\ Q_1 &= 2q_{пер}; \quad Q_2 = 2q_{пер} \cdot l_{пер}; \quad Q_3 = 2q_{пер}. \end{aligned}$$

Підставляючи з (2.16) вираз для $\ddot{y}^{(3)}$ в (2.14) і виконуючи необхідні перетворення, отримуємо:

$$\begin{aligned} N_2 &= -m^* \cdot \{ \bar{m} \cdot [A_3 + (l_{зад} + a_1) \cdot \ddot{\varphi}_3] + k_m \cdot \ddot{\varphi} + \\ &+ \bar{k}_m \cdot \dot{\varphi}^2 + P \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) \}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

де

$$\begin{aligned} m^* &= \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3}; \quad \bar{m} = m_1 + m_2; \\ k_m &= m_1 \cdot A + m_2 \cdot C; \quad \bar{k}_m = m_1 \cdot B + m_2 \cdot D; \end{aligned}$$

$$A_3 = \frac{1}{m_3} \cdot (C_1 \cdot y^{(3)} + C_2 \cdot \varphi_3 - C_3 \cdot \xi_{зад} - C_4 \cdot \xi_{неп} + Q_1 \cdot \dot{y}^{(3)} + Q_2 \cdot \dot{\varphi}_3 - Q_3 \cdot \dot{\xi}_{неп}).$$

В цих же позначеннях перепишемо і вираз (2.11) для сили N_1 :

$$N_1 = m^* \cdot [k_m \cdot \dot{\varphi}^2 - \bar{k}_m \cdot \ddot{\varphi} - P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - \frac{\bar{m}}{m_3} \cdot 6C_{гш} \cdot x^{(3)}]. \quad (2.18)$$

Складемо систему диференційних рівнянь руху складових частин ПУ при нерухомому по відношенню до напрямної снаряді, ввівши до її складу рівняння обертального руху системи «снаряд–напрямна» (2.6), рівняння руху центра мас шасі (2.16) та рівняння обертального руху шасі. Тоді отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\left. \begin{array}{l} 1. [I_C + m^* \cdot (x_k \cdot k_m - y_k \cdot \bar{k}_m)] \cdot \dot{\varepsilon} = P \cdot [x_p \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - y_p \cdot \sin(\theta_0 + \varphi)] - \\ \quad - C_K \cdot (\varphi - \varphi_3) - q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3) - y_k \cdot \tilde{N}_1 + x_k \cdot \tilde{N}_2; \\ 2. \dot{\varphi} = \varepsilon; \\ 3. m_3 \cdot \dot{z} = -N_2 - C_1 y^{(3)} - C_2 \varphi_3 + C_3 \xi_{зад} + C_4 \xi_{неп} - Q_1 \dot{y}^{(3)} - Q_2 \dot{\varphi}_3 + Q_3 \dot{\xi}_{неп}; \\ 4. \dot{y}^{(3)} = z; \\ 5. [I_3 + m^* \cdot \bar{m} \cdot (l_{зад} + a_1)^2] \cdot \dot{\mu} = N_1 \cdot a + N_4 \cdot l_{неп} - N_3 \cdot (l_{зад} - \\ \quad - H) + N_2^* \cdot (l_{зад} + a_1) + C_K \cdot (\varphi - \varphi_3) + q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3); \\ 6. \dot{\varphi}_3 = \mu. \end{array} \right\} \quad (2.19)$$

де
$$N_2^* = -m^* \cdot \{ \bar{m} \cdot A_3 + k_m \cdot \ddot{\varphi} + \bar{k}_m \cdot \dot{\varphi}^2 + P \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) \};$$

$$\tilde{N}_1 = m^* \cdot [k_m \cdot \dot{\varphi}^2 - P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - \frac{\bar{m}}{m_3} \cdot 6C_{Г} \cdot x^{(3)}];$$

$$\tilde{N}_2 = -m^* \cdot \{ \bar{m} \cdot [A_3 + (l_{зад} + a_1) \cdot \ddot{\varphi}_3] + \bar{k}_m \cdot \dot{\varphi}^2 + P \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) \};$$

сили N_3, N_4 визначаються попередніми залежностями; I_3 – момент інерції шасі відносно його центра мас; I_c – момент інерції системи «снаряд–напрямна з рештою снарядів», що може бути визначений за залежностями :

$$I_c = I_{c_1} + I_{c_2} + m_1 \cdot (CC_1)^2 + m_2 \cdot (CC_2)^2,$$

де I_{c_1}, I_{c_2} – моменти інерції снаряда та напрямної без снарядів відносно їх центрів мас; m_1, m_2 – маса снаряда та маса напрямної з рештою снарядів.

$$(CC_1)^2 = [x_1^{(c)}]^2 + [y_1^{(c)}]^2; \quad (C_1C_2)^2 = [x_1^{(2)}]^2 + [y_1^{(2)}]^2;$$

$$(CC_2)^2 = [(C_1C_2) - (CC_1)]^2.$$

Додамо до цих рівнянь рівняння руху мостів. Отримаємо наступну систему диференціальних рівнянь окремих складових ПУ на ділянці відносного спокою снаряда на напрямній

$$\left. \begin{aligned} 1. & [I_c + m^* \cdot (x_k \cdot k_m - y_k \cdot \bar{k}_m)] \cdot \dot{\varepsilon} = P \cdot [x_p \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - \\ & - y_p \cdot \sin(\theta_0 + \varphi)] - C_K \cdot (\varphi - \varphi_3) - q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3) - y_k \cdot \tilde{N}_1 + x_k \cdot \tilde{N}_2; \\ 2. & \dot{\varphi} = \varepsilon; \\ 3. & m_3 \cdot \dot{z} = -N_2 - C_1 y^{(3)} - C_2 \varphi_3 + C_3 \xi_{зад} + C_4 \xi_{неп} - Q_1 \dot{y}^{(3)} - Q_2 \dot{\varphi}_3 + Q_3 \dot{\xi}_{неп}; \\ 4. & \dot{y}^{(3)} = z; \\ 5. & [I_3 + m^* \cdot \bar{m} \cdot (l_{зад} + a_1)^2] \cdot \dot{\mu} = N_1 \cdot a + N_4 \cdot l_{неп} - \\ & - N_3 \cdot (l_{зад} - H) + N_2 \cdot (l_{зад} + a_1) + C_K \cdot (\varphi - \varphi_3) + q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3); \\ 6. & \dot{\varphi}_3 = \mu; \\ 7. & m_n \dot{\eta}_n = 2 \{ C_{неп} (y^{(3)} + \varphi_3 l_{неп} - \xi_{неп}) + q_{неп} (\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 l_{неп} - \dot{\xi}_{неп}) - C_{ш} \xi_{неп} - q_{ш} \dot{\xi}_{неп} \}; \\ 8. & \dot{\xi}_{неп} = \eta_n; \\ 9. & m_c \dot{\eta}_c = 2 C_{сеп} \cdot (y^{(3)} - \varphi_3 \cdot (l_{зад} - H) - \xi_{сеп}) - 2 C_{ш} \cdot \xi_{сеп} - 2 q_{ш} \cdot \dot{\xi}_{сеп}; \\ 10. & \dot{\xi}_{сеп} = \eta_c; \\ 11. & m_3 \dot{\eta}_3 = 2 C_{зад} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3 \cdot (l_{зад} - H) - \xi_{зад}] - 2 C_{ш} \cdot \xi_{зад} - 2 q_{ш} \cdot \dot{\xi}_{зад}; \\ 12. & \dot{\xi}_{зад} = \eta_3, \end{aligned} \right\} (2.20)$$

де m_n, m_c, m_3 , – маси переднього, середнього та заднього мостів; $\xi_{пер}, \xi_{сер}, \xi_{зад}$ – їх вертикальні переміщення з положення статичної рівноваги.

2.1.2 Ділянка відносного поступального руху РС по напрямній ПУ

Ділянка відносного поступального руху снаряда починається з моменту спрацьовування стопорно-замкового пристрою (СЗП) і продовжується до моменту проходження центром ваги снаряда дульного зрізу. Математична модель руху повинна включати в себе рівняння руху окремо снаряда, напрямної та носія. В свою чергу носій складається з шасі і трьох автомобільних мостів. Для складання рівнянь руху снаряда і напрямної скористаємося рис. 2.2 та рис. 2.6, на якому снаряд зображено відокремлено від напрямної разом з діючими на нього силами, а також сили, що діють на напрямну.

Для того, щоб подальші рівняння динаміки системи «РС–ПУ» відповідали руху системи відносно початкового положення статичної рівноваги, що визначається початковими силами тяжіння та пружності і зафіксовано кутом прицілювання θ_0 , на відміну від попередньої ділянки руху до діючих сил додамо прикладену до напрямної силу $\bar{N}_0 = -m_1 \cdot \bar{g}$. Сила \bar{N}_0 дорівнює чисельно силі тяжіння снаряда і штучно прикладається до напрямної в напрямку протилежному дії сили тяжіння $m_1 \bar{g}$ в початковому положенні центра ваги чергового снаряда, що сходить, її лінія дії проходить через точку C'_1 – початкове положення центра ваги снаряда цього снаряда (рис. 2.6). Вона дорівнює силі тиску снаряда на напрямну в початковому положенні статичної рівноваги, що визначається кутом θ_0 , і компенсує її відсутність в цьому положенні при русі снаряда по напрямній. Так як положення статичної рівноваги системи, що розглядається, визначається не тільки значеннями сил тяжіння, а і точками їх прикладення, то це дозволяє компенсувати зміну положення точки прикладення сили $m_1 \bar{g}$ і відобразити рух в системі за рахунок

цієї зміни, зберігши початково обрані положення статичної рівноваги у якості початку відліку переміщення центрів мас напрямної і всіх інших складових частин ПУ. Почергове прикладення сили $\bar{N}_0 = -m_1 \cdot \bar{g}$ до напрямної після спрацьовування СЗП чергового снаряда еквівалентно розвантаження напрямної при сході снарядів.

Такий підхід, на відміну від існуючих [1], дозволяє не проводити попередні розрахунку статичних складових параметрів руху системи, обмежившись розрахунками тільки їх динамічних складових відносно зафіксованого куту прицілювання θ_0 положення статичної рівноваги.

Рівняння відносного поступального руху РС запишемо в проекціях на вісь x_1 пов'язаної з напрямною системи координат $\{C'_1, X_1, Y_1\}$ з початком координат в точці C'_1 , що співпадає з початковим положенням центра мас снаряда на напрямній (рис. 2.6). Вісь x_1 спрямована вздовж напрямної, вісь y_1 їй перпендикулярна. Так як ця система координат рухома, то при записах рівнянь треба враховувати сили інерції.

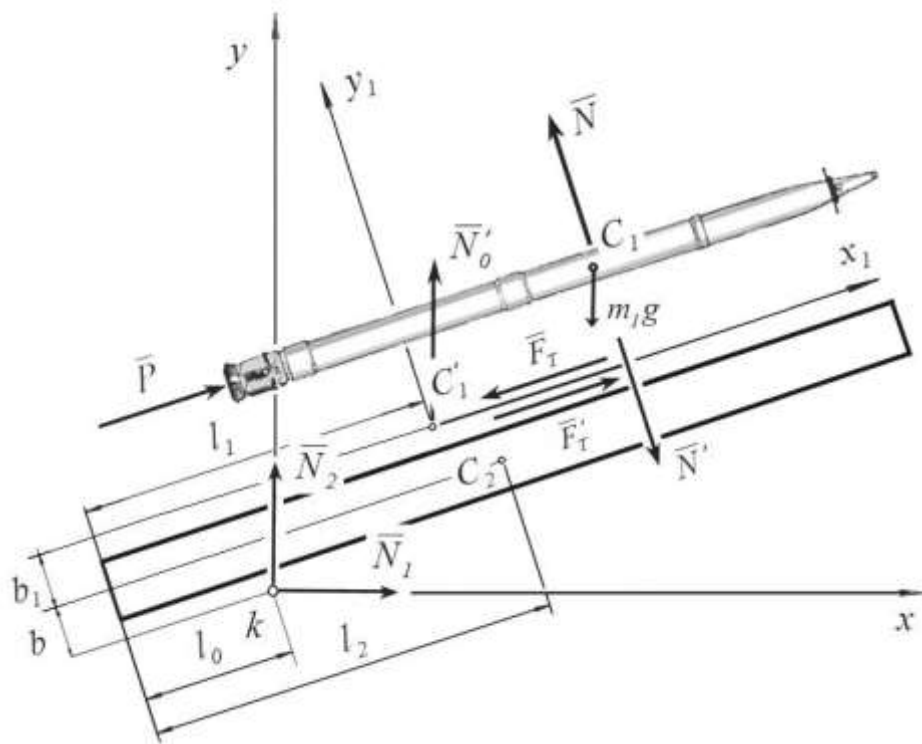


Рисунок 2.6 - Розрахункова схема при відносному поступальному русі снаряда

Нехтуючи коріолісовими силами інерції, що перпендикулярні до напрямку відносного руху, та не беручи до уваги головний момент переносних сил інерції як такий, що не визначає поступальний рух, зведемо сили інерції до головного вектора. Складові цього вектора визначимо на підставі складових переносного прискорення в системі координат $\{C'_1, X_1, Y_1\}$. Ці складові аналогічні складовим прискорення, що зображені на рис. 2.5, наведемо їх на рис. 2.7. Складові \bar{f}_3 та \bar{f}'_3 відповідають поступальному руху системи координат $\{k, x, y\}$ сумісно з точкою з'єднання k , а складові \bar{f}_{eio} та \bar{f}_{dom} – обертання системи координат $\{C'_1, X_1, Y_1\}$ навколо точки k . При цьому:

$$\left. \begin{aligned} f_3 &= m_1 \cdot \ddot{y}^{(3)}; & f'_3 &= m_1 \cdot \ddot{\phi}_3 (l_{zad} + a_1); \\ f_{eio} &= m_1 \cdot (KC_1) \cdot \dot{\phi}^2; & f_{dom} &= m_1 \cdot (KC_1) \cdot \ddot{\phi}; \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

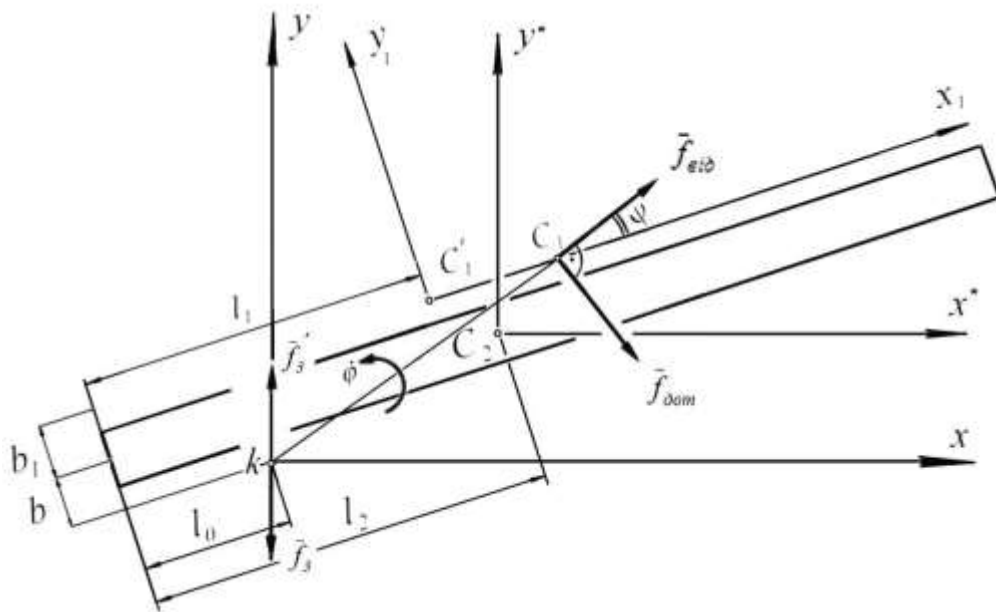


Рисунок 2.7 - Складові сил інерції РС під час руху по ПУ

Відстань від центра мас снаряда до вісі обертання напрямної, що входить до виразів (2.21):

$$(KC_1) = \sqrt{(b + b_1)^2 + (l_1 + x_1 - l_0)^2} \quad (2.22)$$

де $x_1^{(1)}$ - відносна координата центра мас снаряда (точки C_1).

Додаючи проекції діючих сил (рис. 2.6) та сил інерцій (рис. 2.7) на вісь x_1 , отримуємо рівняння руху снаряда по напрямній у вигляді:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1^{(1)} = -m_1 \cdot g \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - F_T + P + f_{eid} \cdot \cos \psi + f_{dom} \cdot \sin \psi + f_3' \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - f_3 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi); \quad (2.23)$$

Рівняння відносного спокою снаряда в напрямку вісі y_1 дає:

$$N - m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + f_{eid} \cdot \sin \psi - f_{dom} \cdot \cos \psi + (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) = 0,$$

звідки маємо

$$N = m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - f_{\text{від}} \cdot \sin \psi + f_{\text{дом}} \cdot \cos \psi - (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi). \quad (2.24)$$

Підставляючи знайдену реакцію в рівняння руху (2.23), отримуємо його у вигляді:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot \ddot{x}_1^{(1)} = & -m_1 \cdot g \cdot [\sin(\theta_0 + \varphi) + \mu \cdot \cos(\theta_0 + \varphi)] + P + \\ & + f_{\text{від}} \cdot [\cos \psi + \mu \cdot \sin \psi] + f_{\text{дом}} \cdot [\sin \psi - \mu \cdot \cos \psi] + \\ & + (f_3' - f_3) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + \mu \cdot (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi), \end{aligned} \quad (2.25)$$

де θ_0 – кут прицілювання; φ – абсолютний кут повороту напрямної і снаряда по відношенню до кута прицілювання, який залишається однаковим для напрямної і снаряда на даній ділянці руху; μ – коефіцієнт тертя поверхні снаряда об напрямну;

$$\sin \psi = \frac{b + b_1}{\sqrt{(b + b_1)^2 + (l_1 + x_1^{(1)} - l_0)^2}}; \quad \cos \psi = \sqrt{1 - \sin^2 \psi};$$

Рівняння обертального руху напрямної запишемо у вигляді:

$$I_{c_2} \cdot \ddot{\varphi} = \sum_i M_{i c_2}, \quad (2.26)$$

де I_{c_2} – момент інерцій напрямної відносно її центра мас; φ – абсолютний кут повороту хитної частини (ХЧ) напрямної; права частина рівняння – додаток моментів зовнішніх сил, що діють на напрямну.

До числа зовнішніх сил (рис. 2.6) відносяться реакції \bar{N}' , \bar{N}_1 та \bar{N}_2 , сила тертя F_T' . Так як параметри руху мають відлік з положення статичної рівноваги, то силу тяжіння напрямної не враховуємо.

При складанні моментів використовуємо як прямий, так і координатний спосіб (для сил, прикладених в точці K). Дію сили тяжіння снаряда враховуємо, віднявши статичну реакцію снаряда \bar{N}_0 в його початковому положенні на напрямній та додавши силу тиску снаряда на напрямну \bar{N}' . При цьому значення сили \bar{N}' визначається залежністю (2.24).

З урахуванням знайдених моментів рівняння (2.26) приймає вигляд:

$$I_{c_2} \cdot \ddot{\varphi} = -N \cdot (l_1 + x_1^{(1)} - l_2) - N_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) \cdot (l_2 - l_1) - N_0 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) \cdot b_1 - C_k(\varphi - \varphi_3) - q_k \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3) - N \cdot \mu \cdot (b_1 - r_m) + x_*^{(k)} \cdot N_2 - y_*^{(k)} \cdot N_1, \quad (2.27)$$

де r_m – радіус міделя РС;

$$\begin{aligned} x_*^{(k)} &= -l_2 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + l_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi); \\ y_*^{(k)} &= -l_2 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + l_0 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi). \end{aligned}$$

Для знаходження складових N_1 та N_2 реакції поворотного механізму хитної частини (ХЧ) напрямної запишемо рівняння руху центра мас напрямної

в проекціях на вісі нерухомої системи координат $\{\hat{I}, x, y\}$. В напрямку вісі x рівняння має вигляд (статичну реакцію \bar{N}_0 – віднімаємо):

$$m_2 \cdot \ddot{x}^{(2)} = N \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + N_1 + F_T \cdot \cos(\theta_0 + \varphi),$$

або ж, враховуючи коефіцієнт тертя:

$$m_2 \cdot \ddot{x}^{(2)} = N[\mu \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + \sin(\theta_0 + \varphi)] + N_1; \quad (2.28)$$

Використовуючи (2.8) та (2.10), після незначних перетворень отримуємо:

$$N_1 = m_1^* \cdot \{-N[\mu \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + \sin(\theta_0 + \varphi)] - m_2 \cdot D \cdot \ddot{\varphi} + m_2 \cdot C \cdot \dot{\varphi}^2 - \frac{m_2}{m_3} \cdot 6C_{гш} \cdot x_3\} \quad (2.29)$$

Диференціальне рівняння руху центра мас напрямної в напрямку вісі y (статичну реакцію \bar{N}_0 віднімаємо) має вигляд:

$$m_2 \cdot \ddot{y}^{(2)} = N_2 + N_0 - N \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + F_T \cdot \sin(\theta_0 + \varphi),$$

або ж, враховуючи коефіцієнт тертя:

$$m_2 \cdot \ddot{y}_2 = N_2 + N_0 + N \cdot [\mu \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + \cos(\theta_0 + \varphi)]. \quad (2.30)$$

Використовуючи (2.13) та (2.16) і проводячи деякі перетворення, будемо мати:

$$N_2 = -m_1^* \cdot \{ N_0 + N[\mu \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + \cos(\theta_0 + \varphi)] + m_2 [A_3 + (l_{зад} + a_1) \cdot \ddot{\varphi}_3] + m_2 \cdot C \cdot \ddot{\varphi} + m_2 \cdot D \cdot \dot{\varphi}^2 \}, \quad (2.31)$$

де $m_1^* = \frac{m_3}{m_2 + m_3}$, а інші величини визначаються попередніми залежностями,

$$A_3 = \frac{1}{m_3} \cdot (C_1 \cdot y^{(3)} + C_2 \cdot \varphi_3 - C_3 \cdot \xi_{зад} - C_4 \cdot \xi_{пер} + Q_1 \cdot \dot{y}^{(3)} + Q_2 \cdot \dot{\varphi}_3 - Q_3 \cdot \dot{\xi}_{пер}).$$

Утворимо систему диференціальних рівнянь руху, ввівши до її складу рівняння руху снаряда по напрямній (2.25), рівняння обертального руху напрямної (2.27), рівняння руху центра мас шасі (2.16) та рівняння обертального руху шасі, а також рівняння руху мостів. Будемо мати:

$$\begin{cases}
1. m_1 \cdot \dot{q} = -m_1 \cdot g \cdot [\sin(\theta_0 + \varphi) + \mu \cdot \cos(\theta_0 + \varphi)] + P + f_{\text{eid}} \cdot [\cos\psi + \mu \cdot \sin\psi] + f_{\text{dom}} \cdot [\sin\psi - \mu \cdot \cos\psi] + (f_3' - f_3) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + \mu \cdot (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi); \\
2. \dot{x}_1^{(1)} = q; \\
3. I_2^* \cdot \dot{\varepsilon} = -(N)^* \cdot \bar{l} + x_*^{(k)} \cdot (N_2)^* \cdot y_*^{(k)} \cdot (N_1)^* - C_k(\varphi - \varphi_3) - q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3) - N_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) \cdot (l_2 - l_1) - N_0 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) \cdot b_1; \\
4. \dot{\varphi} = \varepsilon; \\
5. m_3 \cdot \dot{Z} = -N_2 - C_1 \cdot y^{(3)} - C_2 \cdot \varphi_3 + C_3 \cdot \xi_{3a\delta} + C_4 \cdot \xi_{nep} - Q_1 \cdot \dot{y}^{(3)} - Q_2 \cdot \dot{\varphi}_3 + Q_3 \cdot \dot{\xi}_{nep}; \\
6. \dot{y}^{(3)} = Z \\
7. I_3^* \cdot \dot{\mu} = N_1 \cdot a + N_4 \cdot l_{nep} - N_3 \cdot (l_{3a\delta} - H) + (\tilde{N}_2)^* \cdot (l_{3a\delta} + a_1) + C_k(\varphi - \varphi_3) + q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3); \\
8. \dot{\varphi}_3 = \mu; \\
9. m_n \cdot \dot{\eta}_n = 2C_{nep} \cdot (y^{(3)} + \varphi_3 \cdot l_{nep} - \xi_{nep}) + 2q_{nep} \cdot (\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot l_{nep} - \dot{\xi}_{nep}) - 2C_{uu} \cdot \xi_{nep} - 2q_{uu} \cdot \dot{\xi}_{nep}; \\
10. \dot{\xi}_{nep} = \eta_n; \\
11. m_c \cdot \dot{\eta}_c = 2C_{cep} \cdot (y^{(3)} - \varphi_3 \cdot (l_{3a\delta} - H) - \xi_{cep}) - 2C_{uu} \cdot \xi_{cep} - 2q_{uu} \cdot \dot{\xi}_{cep}; \quad (2.32) \\
12. \dot{\xi}_{cep} = \eta_c; \\
13. m_{3a\delta} \cdot \dot{\eta}_3 = 2C_{3a\delta} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3 \cdot (l_{3a\delta} - H) - \xi_{3a\delta}] - 2C_{uu} \cdot \xi_{3a\delta} - 2q_{uu} \cdot \dot{\xi}_{3a\delta}; \\
14. \dot{\xi}_{3a\delta} = \eta_3,
\end{cases}$$

$$\text{де } \bar{l} = l_1 + x_1^{(1)} - l_2 + \mu \cdot (b_1 - r_{\text{mid}});$$

$$(N)^* = m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - f_{\text{eid}} \cdot \sin\psi - (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi);$$

$$(N_1)^* = m_1^* \{ -(N)^* [\mu \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + \sin(\theta_0 + \varphi)] + m_2 C \dot{\varphi}^2 - \frac{m_2}{m_3} \cdot 6C_{\Gamma\Pi\Pi} x^{(3)} \}$$

$$(N_2)^* = -m_3^* \{ N_0 + (N)^* [\mu \sin(\theta_0 + \varphi) + \cos(\theta_0 + \varphi)] + m_2 [A_3 + (l_{3a\delta} + a_1) \ddot{\varphi}_3] + m_2 D \dot{\varphi}^2 \};$$

$$I_2^* = I_{C_2} + m_1 (KC_1) \cos\psi \cdot \bar{l} + m_1^* m_2 (C x_*^{(k)} - D y_*^{(k)}) + m_1^* m_1 (KC_1) \cos\psi \times [\sin(\theta_0 + \varphi)(\mu x_*^{(k)} - y_*^{(k)}) + \cos(\theta_0 + \varphi)(x_*^{(k)} - \mu y_*^{(k)})];$$

$$I_3^* = I_3 + m_1^* (l_{3a\delta} + a_1)^2 \{ m_2 - m_1 \cos(\theta_0 + \varphi) [\mu \sin(\theta_0 + \varphi) + \cos(\theta_0 + \varphi)] \};$$

$$(\tilde{N})^* = m_1 g \cos(\theta_0 + \varphi) - f_{\text{від}} \sin \psi + f_{\text{дом}} \cos \psi + f_3 \cos(\theta_0 + \varphi);$$

$$(\tilde{N}_2)^* = -m_1^* \{ N_0 + (\tilde{N})^* [\mu \sin(\theta_0 + \varphi) + \cos(\theta_0 + \varphi)] + m_2 (A_3 + C\ddot{\varphi} + D\dot{\varphi}^2) \};$$

2.1.3 Ділянка відносного складного руху РС з гладким корпусом по напрямній ПУ

Після проходження центром ваги снаряда дульного зрізу напрямної створюються умови для надання снаряду додаткової складової руху – обертання відносно напрямної. Якщо снаряд гладкий, то це обертання буде відбуватися таким чином, що при своєму русі снаряд спиратиметься на напрямну в одній точці – точці дульного зрізу. Це остання ділянка руху снаряда по напрямній, на якій остаточно формуються початкові умови руху активної ділянки траєкторії.

Як і на попередній ділянці, будемо розглядати систему такою, що складається з трьох окремих частин: снаряда, напрямної та шасі. та носія. В свою чергу носій складається з шасі і автомобільних мостів. Для складання математичної моделі руху на цій ділянці скористаємося рис. 2.1 та додатковим рис. 2.8.

Введемо наступні системи координат: систему координат $\{k, x, y\}$, що рухаючись поступально, зберігає напрямок попередньо введеної нерухомої системи координат та пов'язану з напрямною систему $\{O, x_1, y_1\}$ з початком координат в опорній точці O дульного зрізу.

Рівняння відносного руху центра мас снаряда в напрямку вісі y_1 має вигляд:

$$m_1 \cdot \ddot{y}_1^{(1)} = N \cdot \cos(\Delta\varphi) + P \cdot \sin(\Delta\varphi) - m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) + f_{\text{від}} \cdot \sin \psi - (2.33) \\ - f_{\text{дом}} \cdot \cos \psi + (f'_3 - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - F_T \cdot \sin(\Delta\varphi),$$

де $\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2)$, на рис. 2.8 він зображений від'ємним; φ_1 – абсолютний кут повороту снаряда; φ_2 – абсолютний кут повороту напрямної; φ_1 та φ_2 відліковуються від кута прицілювання θ_0 ; l – довжина напрямної;

$$\sin \psi = \frac{b + b_1}{\sqrt{(b + b_1)^2 + (l - l_0 + x_1^{(1)})^2}}; \quad \cos \psi = \sqrt{1 - \sin^2 \psi};$$

Рівняння відносного руху центра мас снаряда в напрямку вісі x_1 :

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1^{(1)} = -N \cdot \sin(\Delta\varphi) + P \cdot \cos(\Delta\varphi) - m_1 \cdot g \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2) + f_{\text{від}} \cdot \cos \psi + \quad (2.34)$$

$$+ f_{\text{дом}} \cdot \sin \psi + (f'_3 - f_3) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2) - F_T \cdot \cos(\Delta\varphi),$$

При цьому в рівняннях (2.33) та (2.34) інерційні складові мають значення:

$$\left. \begin{aligned} f_3 &= m_1 \cdot \ddot{y}^{(3)}; & f'_3 &= m_1 \cdot \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{\text{зад}} + a_1); \\ f_{\text{від}} &= m_1 \cdot (KC_1) \cdot \dot{\varphi}_2^2; & f_{\text{дом}} &= m_1 \cdot (KC_1) \cdot \ddot{\varphi}_2; \end{aligned} \right\} \quad (2.35)$$

Відстань від центра мас снаряда до центра обертання напрямної:

$$(KC_1) = \sqrt{(b + b_1)^2 + (l - l_0 + x_1^{(1)})^2} \quad (2.36)$$

Розв'язуючи рівняння (2.33) відносно N , отримуємо значення динамічної реакції:

$$N = \{-P \cdot \sin(\Delta\varphi) + m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - f_{\text{eid}} \cdot \sin\psi + f_{\text{dom}} \cdot \cos\psi - (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) + m_1 \cdot \ddot{y}_1^{(1)}\} / \{\cos(\Delta\varphi) - \mu \cdot \sin(\Delta\varphi)\} \quad (2.37)$$

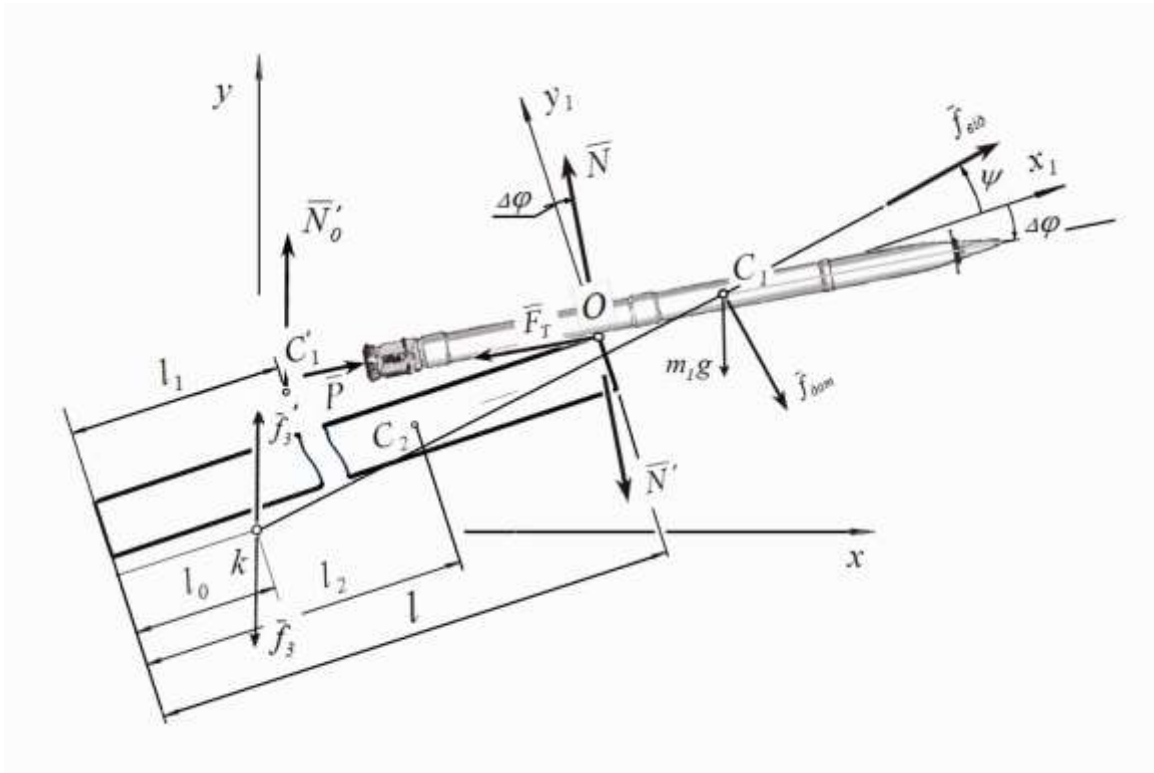


Рисунок 2.8 - Відносний складний рух снаряда по напрямній

Вважаючи кут $\Delta\varphi$ малим, можна записати зв'язок між відносними координатами центра мас снаряда у вигляді

$$y_1^{(1)} = r_{\text{mid}} + x_1^{(1)} \cdot \Delta\varphi \quad (2.38)$$

Диференціюючи двічі вираз (2.38) за часом, отримуємо необхідне значення \ddot{y}_1 , що входить до (2.37):

$$\ddot{y}_1^{(1)} = \ddot{x}_1^{(1)} \cdot \Delta\varphi + 2 \cdot \dot{x}_1^{(1)} \cdot \Delta\dot{\varphi} + x_1^{(1)} \cdot \Delta\ddot{\varphi} \quad (2.39)$$

До рівнянь поступальної складової руху снаряда відносно напрямної додамо рівняння його обертального руху. Це рівняння запишемо для абсолютного руху снаряда, що дасть змогу подальшого підрахування кута вильоту снаряда, під яким будемо розуміти кут, що створює вісь РС в момент сходу з ПУ з

напрямком кута прицілювання θ_0 . За цієї умови скористаємося теоремою про обертальний рух відносно центра мас:

$$I_{c_1} \cdot \ddot{\varphi}_1 = \sum_i M_{i_{c_1}}, \quad (2.40)$$

Підраховуючи моменти діючих сил в правій частині (2.40), маємо:

$$I_{c_1} \cdot \ddot{\varphi}_1 = -N \cdot \left[x_1^{(1)} \cdot \cos(\Delta\varphi) + y_1^{(1)} \cdot \sin(\Delta\varphi) + \mu \cdot r_{mid} \right] \quad (2.41)$$

Перейдемо до складання рівняння обертального руху напрямної у формі (2.36) – (2.37). З урахуванням незначних відмінностей воно приймає вигляд:

$$\begin{aligned} I_{c_2} \cdot \ddot{\varphi}_2 = & -N \cdot (l - l_2) \cdot \cos(\Delta\varphi) + N \cdot (b_1 - r_m) \cdot \sin(\Delta\varphi) - q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3) \\ & - N_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) \cdot (l_2 - l_1) - N_0 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2) \cdot b_1 - C_K \times \\ & \times (\varphi_2 - \varphi_3) - N \cdot \mu \cdot (b_1 - r_m) \cdot \cos(\Delta\varphi) + x_*^{(k)} \cdot N_2 - y_*^{(k)} \cdot N_1, \end{aligned} \quad (2.42)$$

де значення $x_*^{(k)}$, $y_*^{(k)}$ визначаються за залежностями (2.37) із заміною φ на φ_2 .

Складові реакції внутрішньої в'язі при цьому запишуться таким чином:

$$\begin{aligned} N_1 = m_1^* \cdot \{ & -N \cdot [\sin(\theta_0 + \varphi_1) + \mu \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_1)] - \\ & - m_2 \cdot D \cdot \ddot{\varphi}_2 + m_2 \cdot C \cdot \dot{\varphi}_2^2 - \frac{m_2}{m_3} \cdot 6C_{ГШ} \cdot x^{(3)} \} \end{aligned} \quad (2.43)$$

$$\begin{aligned} N_2 = & -m_1^* \cdot \{ N_0 + N[\cos(\theta_0 + \varphi_1) + \mu \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_1)] + \\ & + m_2 \cdot [A_3 + (l_{зад} + a_1) \cdot \ddot{\varphi}_3] + m_2 \cdot C \cdot \dot{\varphi}_2 + m_2 \cdot D \cdot \dot{\varphi}_2^2 \} \end{aligned} \quad (2.44)$$

Створимо систему диференціальних рівнянь руху, ввівши до її складу рівняння руху снаряда (2.34) та (2.41), рівняння обертального напрямної (2.42),

рівняння руху центра мас шасі (2.16) та рівняння обертального руху шасі, а також рівняння руху мостів. Зведемо її до системи рівнянь першого порядку:

$$\left. \begin{aligned}
 1. \quad & m_1 \cdot \dot{q} = -N \cdot \sin(\Delta\varphi) + P \cdot \cos(\Delta\varphi) - m_1 \cdot g \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2) + \\
 & + f_{\text{вiд}} \cdot \cos\psi + f_{\text{дом}} \cdot \sin\psi + (f_3' - f_3) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2) - N \cdot \mu \cdot \cos(\Delta\varphi); \\
 2. \quad & \dot{x}_1^{(1)} = q; \\
 3. \quad & \bar{I}_1 \cdot \dot{p} = -R \cdot \bar{L}; \\
 4. \quad & \dot{\varphi}_1 = p; \\
 5. \quad & \bar{I}_2 \cdot \dot{\varepsilon} = -\bar{N} \cdot \tilde{l} + x_*^{(k)} \cdot \bar{N}_2 - y_*^{(k)} \cdot \bar{N}_1 - C_K \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - q_K \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - \\
 & - N_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) \cdot (l_2 - l_1) - N_0 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2) \cdot b_1; \\
 6. \quad & \dot{\varphi}_2 = \varepsilon; \\
 7. \quad & m_3 \cdot \dot{Z} = -N_2 - C_1 \cdot y_3 - C_2 \cdot \varphi_3 + C_3 \cdot \xi_{\text{зад}} + C_4 \cdot \xi_{\text{неп}} - \\
 & - Q_1 \cdot \dot{y}_3 - Q_2 \cdot \dot{\varphi}_3 + Q_3 \cdot \dot{\xi}_{\text{неп}}; \\
 8. \quad & \dot{y}^{(3)} = Z; \\
 9. \quad & \bar{I}_3 \cdot \dot{\mu} = N_1 \cdot a + N_4 \cdot l_{\text{неп}} - N_3 \cdot (l_{\text{зад}} - H) + \\
 & + (\bar{N}_2)^* \cdot (l_{\text{зад}} + a_1) + C_K \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) + q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3); \\
 10. \quad & \dot{\varphi}_3 = \mu; \\
 11. \quad & m_n \cdot \dot{\eta}_n = 2C_{\text{неп}} \cdot (y^{(3)} + \varphi_3 \cdot l_{\text{неп}} - \xi_{\text{неп}}) + \\
 & + 2q_{\text{неп}} \cdot (\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot l_{\text{неп}} - \dot{\xi}_{\text{неп}}) - 2C_u \cdot \xi_{\text{неп}} - 2q_u \cdot \dot{\xi}_{\text{неп}}; \\
 12. \quad & \dot{\xi}_{\text{неп}} = \eta_n; \\
 13. \quad & m_c \cdot \dot{\eta}_c = 2C_{\text{сер}} \cdot (y^{(3)} - \varphi_3 \cdot (l_{\text{зад}} - H) - \xi_{\text{сер}}) - 2C_u \cdot \xi_{\text{сер}} - 2q_u \cdot \dot{\xi}_{\text{сер}}; \\
 14. \quad & \dot{\xi}_{\text{сер}} = \eta_c; \\
 15. \quad & m_{\text{зад}} \cdot \dot{\eta}_3 = 2C_{\text{зад}} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3 \cdot (l_{\text{зад}} - H) - \xi_{\text{зад}}] - 2C_u \cdot \xi_{\text{зад}} - 2q_u \cdot \dot{\xi}_{\text{зад}}; \\
 16. \quad & \dot{\xi}_{\text{зад}} = \eta_3,
 \end{aligned} \right\} \quad (2.45)$$

де
$$\bar{I}_1 = I_{C_1} + \frac{m_1 \cdot \bar{L} \cdot x_1^{(1)}}{\cos(\Delta\varphi) - \mu \cdot \sin(\Delta\varphi)};$$

$$R = [-P \cdot \sin(\Delta\varphi) + m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - f_{\text{вiд}} \cdot \sin\psi + f_{\text{дом}} \cdot \cos\psi - (f_3' - f_3) \times \\
 \times \cos(\theta_0 + \varphi_2) + m_1 \cdot (\ddot{x}_1^{(1)} \cdot \Delta\varphi + 2 \cdot \dot{x}_1^{(1)} \cdot \Delta\dot{\varphi} - x_1^{(1)} \cdot \ddot{\varphi}_2)] / [\cos(\Delta\varphi) - \mu \cdot \sin(\Delta\varphi)];$$

$$\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2); \quad \Delta\dot{\varphi} = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2);$$

$$\bar{L} = x_1^{(1)} \cdot \cos(\Delta\varphi) + y_1^{(1)} \cdot \sin(\Delta\varphi) + \mu \cdot r_{mid}.$$

$$\text{де} \quad \tilde{l} = (l - l_2) \cdot \cos(\Delta\varphi) + (b_1 - r_{mid}) \cdot [\mu \cdot \cos(\Delta\varphi) - \sin(\Delta\varphi)];$$

$$\bar{N} = [-P \cdot \sin(\Delta\varphi) + m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - f_{\text{вiд}} \cdot \sin\psi - (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) + m_1 \cdot (\ddot{x}_1^{(1)} \cdot \Delta\varphi + 2 \cdot \dot{x}_1^{(1)} \cdot \Delta\dot{\varphi} + x_1^{(1)} \cdot \ddot{\varphi}_1)] / [\cos(\Delta\varphi) - \mu \cdot \sin(\Delta\varphi)];$$

$$\bar{N}_1 = m_1^* \{ -\bar{N} [\mu \cos(\theta_0 + \varphi_1) + \sin(\theta_0 + \varphi_1)] + m_2 C \dot{\varphi}_2^2 - \frac{m_2}{m_3} 6C_{\Gamma} x^{(3)} \};$$

$$\bar{N}_2 = -m_1^* \{ N_0 + \bar{N} [\cos(\theta_0 + \varphi_1) + \mu \sin(\theta_0 + \varphi_1)] + m_2 [A_3 + (l_{\text{зад}} + a_1) \ddot{\varphi}_3] + m_2 D \dot{\varphi}_2^2 \};$$

$$\bar{I}_2 = I_{C_2} + \{ m_1 \tilde{l} [(KC_1) \cos\psi - x_1^{(1)}] \} / \{ \cos(\Delta\varphi) - \mu \sin(\Delta\varphi) \} + m_1^* m_2 (Cx_*^{(k)} - Dy_*^{(k)}) + m_1^* m_1 (KC_1) \cos\psi [\sin(\theta_0 + \varphi_1) (\mu x_*^{(k)} - y_*^{(k)}) + \cos(\theta_0 + \varphi_1) (x_*^{(k)} - \mu y_*^{(k)})];$$

$$\bar{I}_3 = I_3 + m_1^* (l_{\text{зад}} + a_1)^2 \{ m_2 - m_1 \cos(\theta_0 + \varphi_2) \} \times [\mu \sin(\theta_0 + \varphi_1) + \cos(\theta_0 + \varphi_1)];$$

$$(\bar{N})^* = \{ -P \sin(\Delta\varphi) + m_1 g \cos(\theta_0 + \varphi_2) - f_{\text{вiд}} \sin\psi + f_{\text{дом}} \cos\psi + f_3 \cos(\theta_0 + \varphi_2) + m_1 \ddot{y}_1^{(1)} \} / \{ \cos(\Delta\varphi) - \mu \sin(\Delta\varphi) \};$$

$$(\bar{N}_2)^* = -m_1^* \{ N_0 + (\bar{N})^* [\mu \sin(\theta_0 + \varphi_1) + \cos(\theta_0 + \varphi_1)] + m_2 (A_3 + C \ddot{\varphi}_2 + D \dot{\varphi}_2^2) \};$$

2.1.4 Рівняння руху шасі за умови відключення заднього мосту носія

ПУ

Ці рівняння мають однаковий вигляд для всіх трьох згаданих попереду ділянок руху.

1) Рівняння руху центра мас шасі:

$$m_3 \cdot \ddot{y}^{(3)} = -N_2 + N_4 + F_y, \quad (2.46)$$

де F_y – вертикальна складова зусилля, що передається тягою (рис. 2.2):

$$\begin{aligned} F_y &= 2C_{uu}(-y^{(3)} + \varphi_3 \cdot L_1) + 2q_{uu}(-\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot L_1) = \\ &= -2C_{uu}(y^{(3)} - \varphi_3 \cdot L_1) + 2q_{uu}(-\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot L_1). \end{aligned} \quad (2.47)$$

Сила реакції переднього мосту N_4 має попередній вигляд:

$$N_4 = -2C_{nep}(y^{(3)} + \varphi_3 \cdot l_{nep} - \xi_{nep}) - 2q_{nep}(\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot l_{nep} - \dot{\xi}_{nep}).$$

З урахуванням виразів для сил рівняння вертикальних переміщень центра мас шасі запишеться так:

$$\begin{aligned} m_3 \cdot \ddot{y}^{(3)} &= -N_2 - C_1 \cdot y^{(3)} - C_2 \cdot \varphi_3 + C_3 \cdot \xi_{зад} + C_4 \cdot \xi_{nep} - \\ &- Q_1 \cdot \dot{y}^{(3)} - Q_2 \cdot \dot{\varphi}_3 + Q_3 \cdot \dot{\xi}_{nep} + Q_4 \cdot \dot{\xi}_{зад}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

де

$$C_1 = 2C_{nep} + 2C_{uu}; \quad C_2 = 2C_{nep} \cdot l_{nep} - 2C_{uu} \cdot L_1; \quad C_3 = 0; \quad C_4 = 2C_{nep};$$

$$Q_1 = 2q_{nep} + 2q_{uu}; \quad Q_2 = 2q_{nep} \cdot l_{nep} - 2q_{uu} \cdot L_1; \quad Q_3 = 2q_{nep}; \quad Q_4 = 0.$$

Це рівняння (2.48) повинно використовуватися замість рівняння (2.16) у випадку відключення заднього мосту.

2.) Рівняння обертального руху шасі отримаємо, замінивши в них момент сили N_3 на момент сили F_y (рис. 2.2). Наприклад, рівняння обертального руху шасі на першій ділянці (рівняння 5. системи 2.20) приймає вигляд:

$$[I_3 + m^* \cdot \bar{m} \cdot (l_{зад} + a_1)^2] \cdot \ddot{\varphi}_3 = N_1 \cdot a + N_4 \cdot l_{неп} - F_y \cdot L_1 + N_2^*(l_{зад} + a_1) + C_K \cdot (\varphi - \varphi_3) + q_K \cdot (\dot{\varphi} - \dot{\varphi}_3).$$

Додамо до цих рівнянь рівняння руху мостів.

$$\left. \begin{aligned} 1. \quad m_n \dot{\eta}_n &= 2C_{неп} (y^{(3)} + \varphi_3 l_{неп} - \xi_{неп}) + 2q_{неп} (\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 l_{неп} - \dot{\xi}_{неп}) - 2C_{ш} \xi_{неп} - 2q_{ш} \dot{\xi}_{неп}; \\ 2. \quad \dot{\xi}_{неп} &= \eta_n; \\ 3. \quad \dot{\eta}_3 &= \ddot{y}_3 - \ddot{\varphi}_3 \cdot L_1; \\ 4. \quad \dot{\xi}_{зад} &= \eta_3, \end{aligned} \right\}$$

В цій ситуації рухом середнього мосту, що не є опорним можна нехтувати.

2.2 Математичне моделювання руху РС та пружної ПУ, змонтованої на автомобільному шасі при стрільбі під курсовим кутом 90°

Розглянемо розрахункову схему системи «РС–ПУ», що зображена на рис.

2.9. Вона відповідає стрільбі за умови повороту пакету напрямних в бік на 90° відносно поздовжньої вісі шасі. У цьому випадку рух системи «РС–ПУ» будемо розглядати як просторовий. Для розробки його математичної моделі можливо використати попередні рівняння, що були записані за умов площинних моделей руху складових системи «РС–ПУ». Розглянемо окремі послідовні ділянки руху, які зазначені в попередніх розділах та внесемо необхідні зміни та доповнення до існуючих рівнянь.

2.2.1 Ділянка відносного спокою снаряда на напрямній ПУ

Розглянемо спочатку рівняння обертального руху сукупності «снаряд–напрямна», вважаючи їх одним твердим тілом. Ці рівняння можливо отримати на підставі рівнянь динаміки обертального руху твердого тіла відносно центра мас (рівняння Ейлера), які в загальному вигляді записуються таким чином:

$$\begin{cases} I_x \cdot \dot{\omega}_x + (I_z - I_y) \cdot \omega_y \cdot \omega_z = m_x \\ I_y \cdot \dot{\omega}_y + (I_x - I_z) \cdot \omega_x \cdot \omega_z = m_y \\ I_z \cdot \dot{\omega}_z + (I_y - I_x) \cdot \omega_x \cdot \omega_y = m_z \end{cases} \quad (2.49)$$

де x, y та z – головні центральні осі інерції тіла; I_x, I_y, I_z – відповідні головні центральні моменти інерції тіла; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції кутової швидкості тіла на головні центральні вісі інерції.

На даній ділянці руху снаряд та напрямну з точки зору динаміки руху будемо розглядати як одне тверде тіло, але з точки зору структури системи, окремо будемо розглядати дві її складові: напрямну та снаряд. Під снарядом в подальшому будемо розуміти снаряд з працюючим реактивним двигуном. Напрямну будемо розглядати разом з усіма розміщеними на ній снарядами в пакеті напрямних крім одного РС з працюючим двигуном. Третьою складовою системи «РС–ПУ» є носій, що включає шасі та автомобільні мости.

Введемо пов'язану з напрямною рухомою систему координат $\{C, x_2, y_2, z_2\}$ з початком в загальному центрі мас напрямної і снаряда (рис.2.9). Будемо у першому наближенні вважати вісі $\{C, x_2, y_2, z_2\}$ головними центральними осями інерції. Вісь x_2 спрямована вздовж напрямної в вертикальній площині її симетрії, вісь y_2 спрямована перпендикулярно вісі x_2 вгору в вертикальній площині симетрії напрямної, вісь z_2 перпендикулярна вісям x_2 та y_2 і утворює з ними праву тройку осей. Обмежимося розглядом обертальних рухів напрямної в площині стрільби та в боковому напрямку, як таких рухів, що

насамперед впливають на розсіювання снарядів по дальності та по напрямку стрільби. На підставі (2.49) будемо мати:

$$\begin{cases} I_{z_2} \dot{\omega}_{z_2} + (I_{y_2} - I_{x_2}) \cdot \omega_{x_2} \cdot \omega_{y_2} = m_{z_2} \\ I_{y_2} \dot{\omega}_{y_2} + (I_{x_2} - I_{z_2}) \cdot \omega_{x_2} \cdot \omega_{z_2} = m_{y_2} \end{cases} \quad (2.50)$$

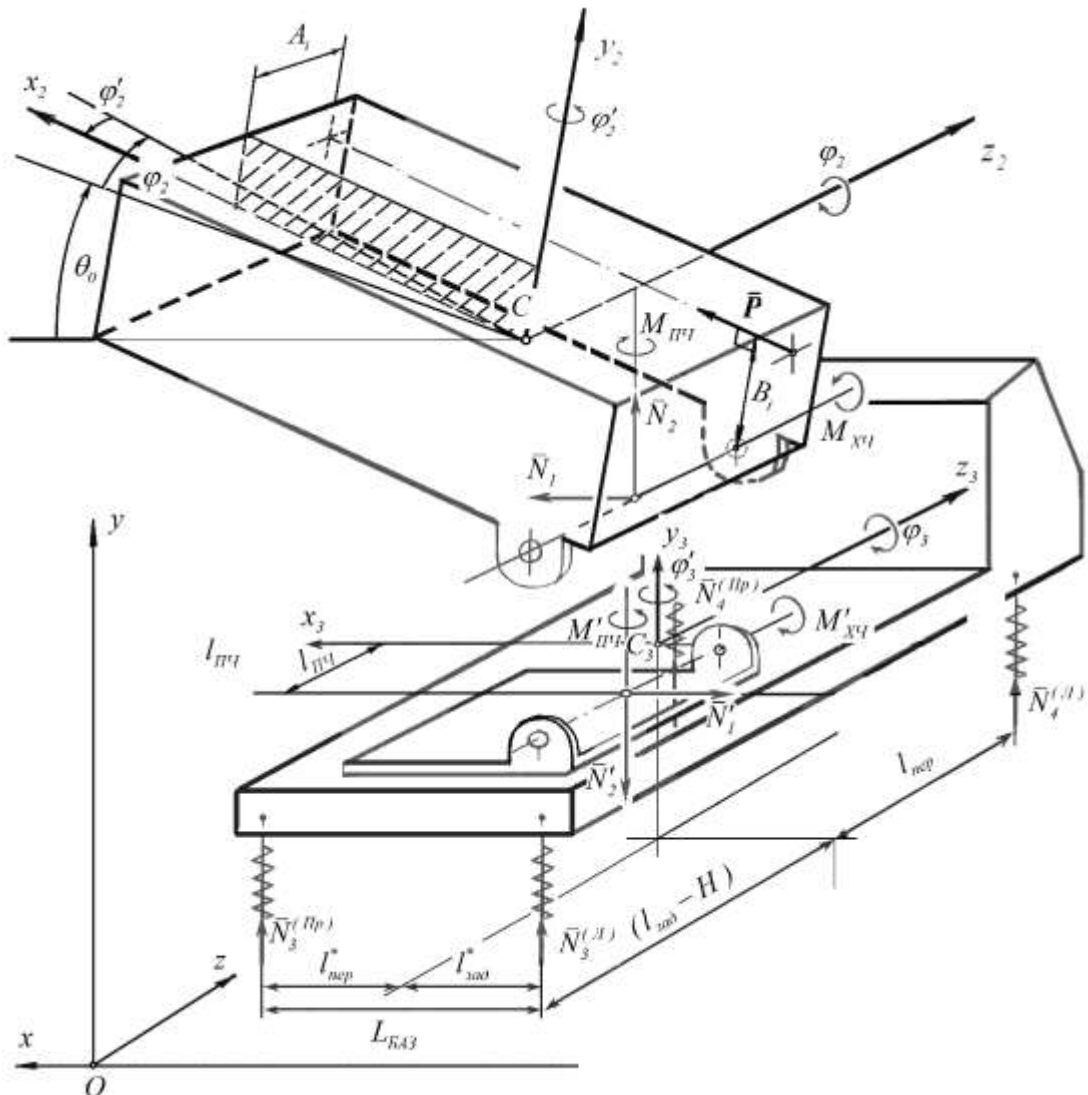


Рисунок 2.9 - Розрахункова схема при відносному спокої РС на напрямній

Нехтуючи другими складовими в лівих частинах рівнянь (2.50) у порівнянні з їх першими складовими ($\omega_{x_2} \approx 0$, $I_{y_2} - I_{x_2} < I_{z_2}$, $I_{x_2} - I_{z_2} < I_{y_2}$), в решті обмежимося такими рівняннями руху напрямної (її хитної частини):

$$\begin{cases} I_{z_2} \dot{\omega}_{z_2} = m_{z_2} \\ I_{y_2} \dot{\omega}_{y_2} = m_{y_2} \end{cases} \quad (2.51)$$

Положення загального центру мас системи «снаряд-напрямна», координати точок прикладення сил і моменти діючих сил відносно центру мас системи «снаряд-напрямна» будемо визначати за залежностями розділу 2.1.1.

Орієнтацію напрямної в просторі будемо визначати взаємним кутовим положенням системи координат $\{\tilde{N}, x_3, y_3, z_3\}$ та її початкового положення $\{\tilde{N}_0, x_{20}, y_{20}, z_{20}\}$.

Подібні системи координатних осей введемо і для шасі. Система координат $\{\tilde{N}_3, x_3, y_3, z_3\}$ пов'язана з шасі і має свій початок в центрі мас шасі. Вісь z_3 при цьому співпадає з поздовжньою віссю симетрії шасі. Нерухома система осей $\{\tilde{N}_{30}, x_{30}, y_{30}, z_{30}\}$ співпадає з початковим положенням системи $\{\tilde{N}_3, x_3, y_3, z_3\}$. Вісь z_{30} – поздовжня вісь симетрії шасі, вісь x_{30} – горизонтальна, а вісь y_{30} – вертикальна. Орієнтацію шасі будемо визначати взаємним положенням систем координат $\{\tilde{N}_3, x_3, y_3, z_3\}$ та $\{\tilde{N}_{30}, x_{30}, y_{30}, z_{30}\}$. За аналогією з (2.51), рівняння обертального руху шасі запишемо у вигляді:

$$I_{z_3} \cdot \ddot{\varphi}_3 = m_{z_3}; \quad I_{y_3} \cdot \ddot{\varphi}'_3 = m_{y_3}; \quad I_{x_3} \cdot \ddot{\varphi}''_3 = m_{x_3}. \quad (2.52)$$

Взаємне положення двох системи координат розглянуто на рис. 2.10.

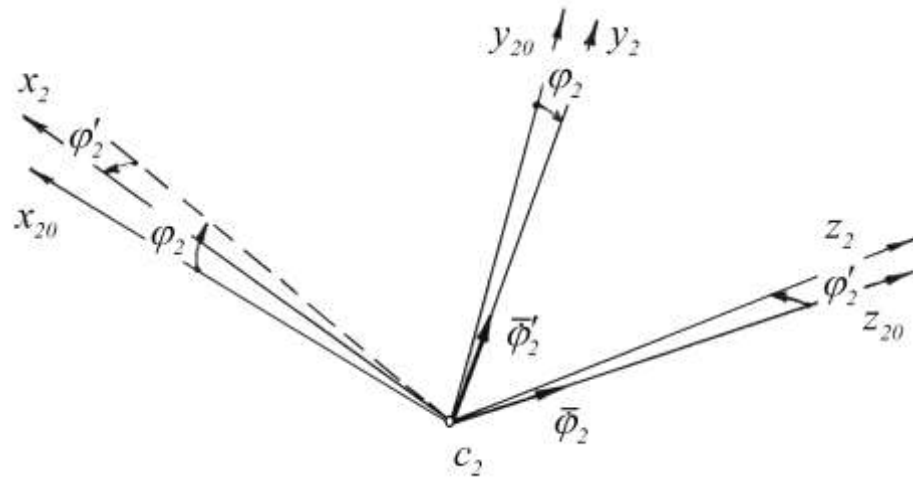


Рисунок 2.10 - Взаємне положення рухомої та нерухомої системи координат при їх суміщенні

Нерухомі вісі координат $\{\tilde{N}_0, x_{20}, y_{20}, z_{20}\}$ та жорстко пов'язані з напрямною рухомі координатні вісі $\{\tilde{N}, x_3, y_3, z_3\}$ зведені до однієї точки, де зображені кути φ_2 і φ'_2 що визначають кутове положення напрямної відносно нерухомих осей, а також вектори відповідних складових кутової швидкості напрямної зі снарядом. Записуючи проекції кутової швидкості сукупності «снаряд–напрямна» на вісі рухомої системи координат як додаток проекцій цих складових, будемо мати:

$$\begin{cases} \omega_{z_2} = \dot{\varphi}_2 \cdot \cos \varphi'_2 \\ \omega_{y_2} = \dot{\varphi}'_2 \end{cases} \quad (2.53)$$

Вважаючи, що кути повороту напрямної досить малі, тобто $\cos \varphi'_2 \approx 1$, отримуємо:

$$\begin{cases} \omega_{z_2} = \dot{\varphi}_2 \\ \omega_{y_2} = \dot{\varphi}'_2 \end{cases} \quad (2.54)$$

Підставляючи (2.54) в (2.51), отримуємо рівняння обертального руху напрямної у вигляді:

$$\begin{cases} I_{z_2} \cdot \ddot{\varphi}_2 = m_{z_2} \\ I_{y_2} \cdot \ddot{\varphi}'_2 = m_{y_2} \end{cases} \quad (2.55)$$

Для того, щоб максимально використати існуючі рівняння на рис. 2.9 та рис. 2.11 зроблені позначення, які відповідають позначенням на рис. 2.2. Рисунок 2.12 – допоміжний і є видом, що утворюється при погляді вздовж осі z_3 згідно рис. 2.9.

Якщо при складанні рівнянь в'язів, що пов'язують координати центрів мас напрямної і снаряда з координатами центра мас шасі, будемо враховувати повороти шасі відносно поперечної осі x_3 , то ці рівняння будуть мати вигляд рівнянь (2. 8) та дещо змінених рівнянь (2.13), або ж:

$$\begin{cases} \ddot{x}^{(1)} = \ddot{x}_3 - \ddot{\varphi} \cdot B + \dot{\varphi}^2 \cdot A \\ \ddot{x}^{(2)} = \ddot{x}_3 - \ddot{\varphi} \cdot D + \dot{\varphi}^2 \cdot C \end{cases}$$

$$\begin{cases} \ddot{y}^{(1)} = \ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{3a0}^* + a_1) - \ddot{\varphi} \cdot A - \dot{\varphi}^2 \cdot B - \ddot{\varphi}_3'' \cdot l_{ПЧ} \\ \ddot{y}^{(2)} = \ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{3a0}^* + a_1) - \ddot{\varphi} \cdot C - \dot{\varphi}^2 \cdot D - \ddot{\varphi}_3'' \cdot l_{ПЧ} \end{cases}$$

Рівняння руху центра мас шасі з положення його статичної рівноваги в проєкціях на вертикальну нерухому вісь y має вигляд (2.15), де

$$\begin{cases} N_3 = N_3^{(\dot{\delta})} + N_3^{(\ddot{E})} \\ N_4 = N_4^{(\dot{\delta})} + N_4^{(\ddot{E})} \end{cases} \quad (2.56)$$

Сили, що виникають на задній підвісці (рис. 2.9, рис. 2.11, рис. 2.12):

$$\begin{aligned} N_3^{(II)} = & 2 \cdot C_{зад} \cdot [-y^{(3)} + \varphi_3 \cdot l_{зад}^* - \dot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} - H) - \psi_{зад} \cdot l_{зад}^* + \xi_{зад}] + \\ & + q_{зад} \cdot [-\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot l_{зад}^* - \dot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} - H) - \dot{\psi}_{зад} \cdot l_{зад}^* + \dot{\xi}_{зад}] ; \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} N_3^{(III)} = & 2 \cdot C_{зад} \cdot [-y^{(3)} - \varphi_3 \cdot l_{пер} - \dot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} - H) + \psi_{зад} \cdot l_{пер} + \xi_{зад}] + \\ & + q_{зад} \cdot [-\dot{y}^{(3)} - \dot{\varphi}_3 \cdot l_{пер} - \dot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад} - H) + \dot{\psi}_{зад} \cdot l_{пер} + \dot{\xi}_{зад}] . \end{aligned}$$

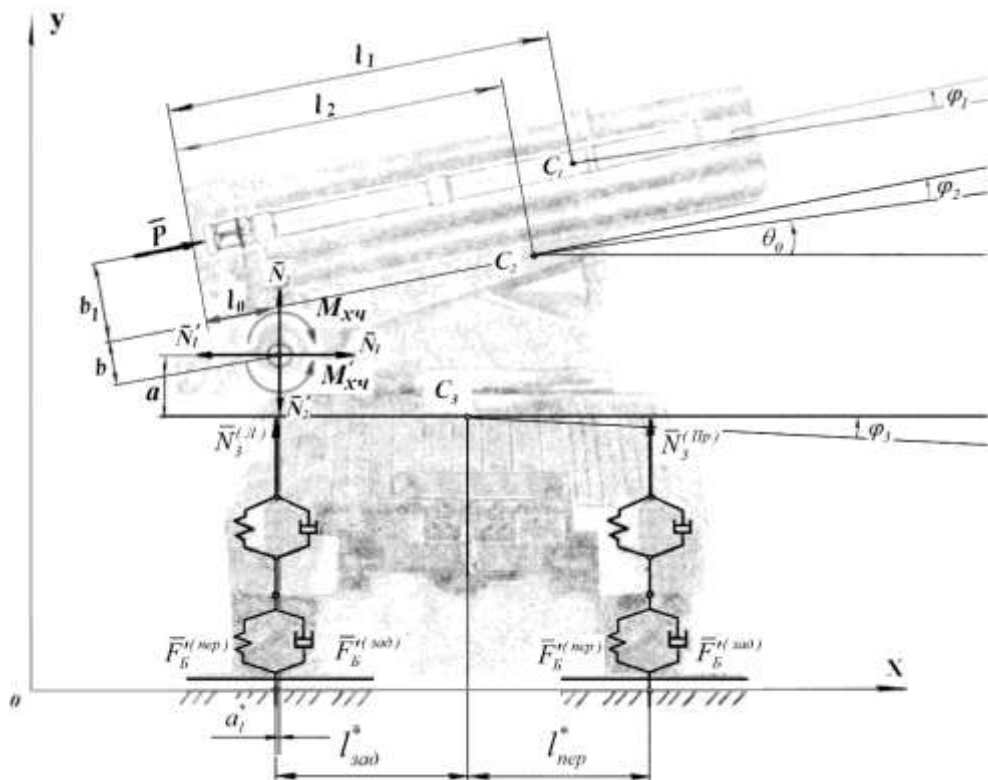


Рисунок 2.11 - Розрахункова схема РС-ПУ при відносному спокої снаряда на напрямній (погляд на кабінку носія)

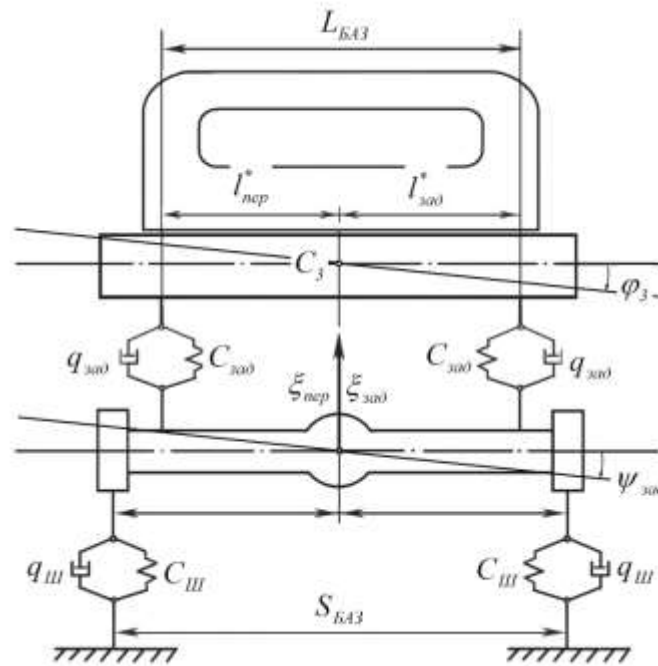


Рисунок 2.12 - Розрахункова схема поперечно-кутових коливань шасі

Аналогічно, сили, що виникають на передній підвісці:

$$\begin{aligned}
 N_4^{(П)} &= C_{пер} \cdot [-y^{(3)} + \varphi_3 \cdot l_{зад}^* + \varphi_3'' \cdot l_{пер} - \psi_{пер} \cdot l_{зад}^* + \xi_{пер}] + \\
 &\quad + q_{пер} \cdot [-\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3 \cdot l_{зад}^* + \dot{\varphi}_3'' \cdot l_{пер} - \dot{\psi}_{пер} \cdot l_{зад}^* + \dot{\xi}_{пер}]; \\
 N_4^{(Пр)} &= C_{пер} \cdot [-y^{(3)} - \varphi_3 \cdot l_{пер}^* + \varphi_3'' \cdot l_{пер} + \psi_{пер} \cdot l_{пер}^* + \xi_{пер}] + \\
 &\quad + q_{пер} \cdot [-\dot{y}^{(3)} - \dot{\varphi}_3 \cdot l_{пер}^* + \dot{\varphi}_3'' \cdot l_{пер} + \dot{\psi}_{пер} \cdot l_{пер}^* + \dot{\xi}_{пер}].
 \end{aligned} \tag{2.58}$$

де $l_{пер}^* = l_{зад}^* = \frac{l}{2} \cdot L_{БАЗ}$, $\psi_{пер}$, $\psi_{зад}$ – кути повороту переднього та заднього мостів з положень їх статичної рівноваги.

Підставляючи в (2.15) значення сил та враховуючи, що $l_{пер}^* = l_{зад}^*$, будемо мати

$$m_3 \ddot{y}^{(3)} = -N_2 - \tilde{C}_1 y^{(3)} + \tilde{C}_3 \xi_{зад} + \tilde{C}_4 \xi_{пер} + \tilde{C}_5 \varphi_3'' - \tilde{Q}_1 \dot{y}^{(3)} + \tilde{Q}_3 \dot{\xi}_{пер} + \tilde{Q}_4 \dot{\xi}_{зад} + \tilde{Q}_5 \dot{\varphi}_3'', \tag{2.59}$$

де $\tilde{C}_1 = 2C_{пер} + 4C_{зад}$; $\tilde{C}_3 = 4C_{зад}$; $\tilde{C}_4 = 2C_{пер}$; $\tilde{C}_5 = 2C_{пер} \cdot l_{пер} - 4C_{зад} \cdot (l_{зад} - H)$;

$$\tilde{Q}_1 = 2q_{nep} + 2q_{зад}; \quad \tilde{Q}_3 = 2q_{nep}, \quad \tilde{Q}_4 = 4q_{зад}; \quad \tilde{Q}_5 = 2q_{nep} \cdot l_{nep} - 2q_{зад} \cdot (l_{зад} - H).$$

Рівняння (2.14) при цьому набуває вигляду:

$$(m_1 + m_2) [\ddot{y}^{(3)} - \ddot{\varphi}_3(l_{зад} + a_1) - \ddot{\varphi}_3'' l_{nc}] - \ddot{\varphi} (m_1 A + m_2 C) - \dot{\varphi}^2 (m_1 B + m_2 D) = P \sin(\theta_0 + \varphi) + N_2.$$

Підставляючи з (2.59) вираз для \ddot{y}_3 в останнє рівняння і виконуючи необхідні перетворення, отримуємо ($\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$):

$$N_2 = -m^* \cdot \{ \bar{m} \cdot [\tilde{A}_3 + (l_{зад}^* + a_1^*) \cdot \ddot{\varphi}_3 + \ddot{\varphi}_3'' \cdot l_{nc}] + k_m \cdot \ddot{\varphi} + \bar{k}_m \cdot \dot{\varphi}^2 + P \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) \}. \quad (2.60)$$

де $m^* = \frac{m_3}{m_1 + m_2 + m_3}$; $\bar{m} = m_1 + m_2$; k_m і \bar{k}_m – визначаються попередніми залежностями (2.17);

$$\tilde{A}_3 = \frac{I}{m_3} (\tilde{C}_1 y^{(3)} - \tilde{C}_3 \xi_{зад} - \tilde{C}_4 \xi_{nep} - \tilde{C}_5 \varphi_3'' + Q_1 \dot{y}^{(3)} - \tilde{Q}_3 \dot{\xi}_{nep} - \tilde{Q}_4 \dot{\xi}_{зад} - \tilde{Q}_5 \ddot{\varphi}_3'').$$

Тепер знайдемо складову N_1 реакції внутрішньої в'язі. Рівняння руху центра мас напрямної зі снарядом у відхиленнях з положення статичної рівноваги в напрямку вісі x має вигляд (2.7), тобто:

$$(m_1 + m_2) \cdot \ddot{x}^{(c)} = P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) \cdot \cos \varphi_2' + N_1, \quad (2.61)$$

де

$$(m_1 + m_2) \cdot \ddot{x}^{(C)} = m_1 \cdot \ddot{x}^{(1)} + m_2 \cdot \ddot{x}^{(2)},$$

$x^{(1)}, x^{(2)}, x^{(C)}$ – координати центрів мас снаряда, напрямної та їх загального центру мас відповідно.

Користуючись рис. 2.11, складемо рівняння зв'язків. Двічі диференціюючи його, отримуємо співвідношення у вигляді (2.8):

$$\begin{cases} \ddot{x}^{(1)} = \ddot{x}^{(3)} - \ddot{\varphi}_2 \cdot B + \dot{\varphi}_2^2 \cdot A \\ \ddot{x}^{(2)} = \ddot{x}^{(3)} - \ddot{\varphi}_2 \cdot D + \dot{\varphi}_2^2 \cdot C \end{cases} \quad (2.62)$$

Значення величин A, B, C, D визначаються попередніми співвідношеннями (2.8).

Рівняння руху центра мас шасі в напрямку нерухомої вісі x запишемо з урахуванням сил бокової жорсткості коліс (ці сили зображені на рис. 2.11). Їх напрямок на малюнку відповідає боковим деформаціям еластичних коліс при ймовірних кутових та бокових переміщеннях шасі. На рис. 2.13 зображено еластичне колесо, з якого видно механізм утворення бокової сили \overline{F}_B . Вважаючи, що виникаючі сили пропорційні боковим зміщенням, запишемо складові бокових сил.

Бокова пружна сила, що виникає на еластичному колесі за рахунок поступального зміщення шасі в напрямку вісі x

$$F_B = -C_{БШ} \cdot x^{(3)} - q_{БШ} \cdot \dot{x}_3^{(3)},$$

де $C_{БШ}, q_{БШ}$ – коефіцієнти бокової жорсткості та демпфування колеса, $x^{(3)}$ – зміщення центра мас шасі з положення рівноваги в напрямку вісі x .

Бокова сила, що виникає на передньому колесі за рахунок повороту шасі:

$$F_B^{(пер)} = -C_{БШ} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot l_{пер} - q_{бш} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot l_{пер}.$$

Бокова на сила, що виникає на колесах заднього мосту за рахунок повороту шасі:

$$F_B^{(зад)} = C_{БШ} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot (l_{зад} - 2H) + C_{БШ} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot l_{зад} + q_{бш} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot [(l_{зад} - 2H) + l_{зад}]$$

Знаки сил співвідносяться з напрямком вісі x (рис.2.9, рис. 2.11).
Враховуючи зазначені сили, маємо:

$$m_3 \cdot \ddot{x}^{(3)} = -N_l + 6F_B + 2F_B^{(пер)} + 2F_B^{(зад)},$$

або ж

$$\begin{aligned} m_3 \cdot \ddot{x}^{(3)} = & -N_l - 6C_{БШ} \cdot x^{(3)} + 2C_{БШ} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot [(l_{зад} - 2H) + l_{зад} - l_{пер}] \\ & - 6q_{БШ} \cdot \dot{x}^{(3)} + 2q_{БШ} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot [(l_{зад} - 2H) + l_{зад} - l_{пер}]. \end{aligned} \quad (2.63)$$

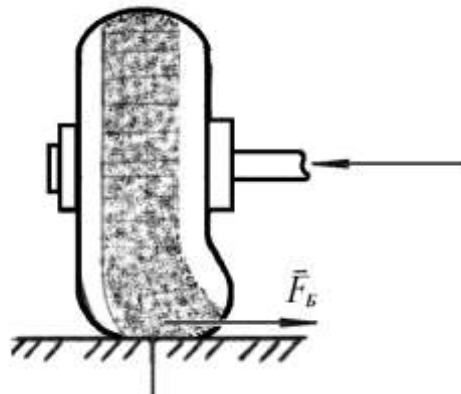


Рисунок 2.13 - Виникнення бокової сили на еластичному колесі при його боковому зміщенні

З рівняння (2.63) знаходимо (подібно 2.10):

$$\ddot{x}^{(3)} = \frac{1}{m_3} \{ -N_1 - 6C_{БШ} \cdot x^{(3)} + 2C_{БШ} \cdot \varphi_3' \cdot [(l_{зад} - 2H) + l_{зад} - l_{пер}] - 6q_{БШ} \cdot \dot{x}^{(3)} + 2q_{БШ} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot [(l_{зад} - 2H) + l_{зад} - l_{пер}] \}. \quad (2.64)$$

Підставляючи в (2.61) вирази (2.62) та враховуючи (2.64), після деяких перетворень маємо:

$$\frac{m_1 + m_2}{m_3} \{ -N_1 - 6C_{БШ} x^{(3)} + 2C_{БШ} \varphi_3' [(l_{зад} - 2H) + l_{зад} - l_{пер}] - 6q_{БШ} \dot{x}^{(3)} + 2q_{БШ} \dot{\varphi}_3' [(l_{зад} - 2H) + l_{зад} - l_{пер}] \} - (m_1 B + m_2 D) \ddot{\varphi}_2 + (m_1 A + m_2 C) \dot{\varphi}_2^2 = P \cos(\theta_0 + \varphi_2) + N_1,$$

звідки отримуємо подібно (2.11):

$$N_1 = m^* \{ k_m \cdot \dot{\varphi}_2^2 - \bar{k}_m \cdot \ddot{\varphi}_2 - P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \frac{\bar{m}}{m_3} [6C_{БШ} \cdot x^{(3)} - 2C_{БШ} \cdot \varphi_3' \times (2l_{зад} - 2H - l_{пер}) + 6q_{БШ} \cdot \dot{x}^{(3)} - 2q_{БШ} \cdot \dot{\varphi}_3' (2l_{зад} - 2H - l_{пер})] \}, \quad (2.65)$$

де значення m^* , \bar{m} , k_m і \bar{k}_m – визначаються залежностями (2.17).

Повернемося тепер до запису рівнянь (2.55) обертального руху напрямної. Зберігши всі попередні позначення лінійних та кутових параметрів, отримуємо рівняння обертального руху сукупності «снаряд–напрямна» навколо вісі Z_2 у вигляді (2.6), тобто:

$$I_{z_2} \cdot \ddot{\varphi}_2 = P \cdot [x_p \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - y_p \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2)] - \\ - y_k \cdot N_1 + x_k \cdot N_2 - C_k \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - q_{XЧ} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3). \quad (2.66)$$

де x_p, y_p, x_k, y_k визначаються залежностями (2.4), (2.5); при цьому геометричний параметр b_1 визначається як $b_1 = B_i - b$, (рис. 2.14).

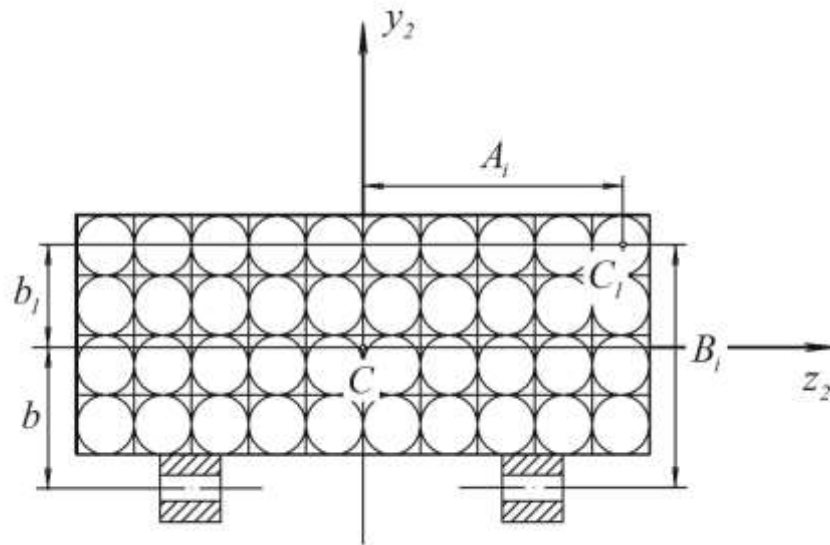


Рисунок 2.14 - Параметри, що визначають координати положення осі трубчатої напрямної в пакеті

Момент інерції напрямної зі снарядом I_{z_2} визначимо так:

$$I_{z_2} = I_{C_1} + I_{C_2} + m_1 \cdot (CC_1)^2 + m_2 \cdot (CC_2)^2 \quad (2.67)$$

де I_{C_1}, I_{C_2} – моменти інерції снаряда та напрямної відповідно осей, що паралельні осі z_2 та проходять через центри мас снаряда і напрямної відповідно; m_1, m_2 – маси снаряда та напрямної; інші необхідні величини визначаються за залежностями (2.3).

$$(CC_1)^2 = [x_1^{(C)}]^2 + [y_1^{(C)}]^2; \quad (CC_2)^2 = [(C_1C_2) - (CC_1)]^2$$

$$(C_1C_2)^2 = \sqrt{[x_1^{(2)}]^2 + [y_1^{(2)}]^2}$$

На рис. 2.14 величина B_i геометричний параметр, що визначає положення трубчатої напрямної в пакеті.

Тепер перейдемо до другого з рівнянь (2.55) для обертального руху напрямної (повертальної частини = ПЧ). Вважаючи, що лінії дії сил реакції внутрішньої в'язі \vec{N}_1 та \vec{N}_2 залишаються надто близькими до вісі y_2 , нехтуємо моментами цих сил. Тоді рівняння набуває вигляду:

$$I_{y_2} \cdot \ddot{\varphi}'_2 = P \cdot A_i - C_{ПЧ} \cdot [\varphi'_2 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \varphi'_3] \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - q_{ПЧ} \cdot [\dot{\varphi}'_2 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \dot{\varphi}'_3] \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2). \quad (2.68)$$

де P – сила тяги двигуна; A_i – геометричний параметр осі труби в пакеті напрямної; $C_{ПЧ}$ – коефіцієнт кутової жорсткості поворотної частини пакету напрямних; I_{y_2} – момент інерції частини, яка повертається (ПЧ) відносно вісі y_2 ; $q_{ПЧ}$ – коефіцієнт кутового демпфування поворотної частини напрямної.

Перша складова правої частини (2.68) – момент сили тяги, що передається через стопор на напрямну. Друга складова – пружний момент, що виникає при кутових переміщеннях частини, яка повертається (ПЧ) відносно шасі. Моментом інерції механізму поворотної частини напрямної в порівнянні з моментом інерції самої поворотної частини – нехтуємо. Остання складова – демпфуючий момент механізму ПЧ.

Рівняння обертального руху шасі за формою рівнянь (2.52) запишемо у вигляді :

$$I_{Z_3} \cdot \ddot{\varphi}_3 = m_{z_3}; \quad I_{y_3} \cdot \ddot{\varphi}'_3 = m_{y_3}; \quad I_{x_3} \cdot \ddot{\varphi}''_3 = m_{x_3}. \quad (2.69)$$

Користуючись рис. 2.9, маємо:

$$I_{Z_3} \cdot \ddot{\varphi}_3 = N_3^{(Пр)} \cdot l_{неп}^* - N_3^{(Л)} \cdot l_{зад}^* + N_4^{(Пр)} \cdot l_{неп}^* - N_4^{(Л)} \cdot l_{зад}^* + N_1 \cdot a + \\ + N_2 \cdot (l_{зад}^* + a_1^*) - C_{хч} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) - q_{хч} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2).$$

Або ж, приймаючи, що $l_{неп}^* = l_{зад}^*$:

$$I_{Z_3} \cdot \ddot{\varphi}_3 = [(N_3^{(Пр)} - N_3^{(Л)}) + (N_4^{(Пр)} - N_4^{(Л)})] \cdot l_{неп}^* + N_1 \cdot a + \\ + N_2 \cdot (l_{зад}^* + a_1^*) - C_{хч} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) - q_{хч} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2). \quad (2.70)$$

Підставляючи в (2.70) вирази (2.57) та (2.58) для сил, після подальших незначних перетворень маємо:

$$I_{Z_3} \cdot \ddot{\varphi}_3 = [2C_{зад}(-\varphi_3 + \psi_{зад}) \cdot (l_{неп}^* + l_{зад}^*) + q_{зад}(-\dot{\varphi}_3 + \dot{\psi}_{зад}) \times (l_{неп}^* + l_{зад}^*)] \cdot l_{неп}^* + \\ [C_{неп}(-\varphi_3 + \psi_{неп}) \cdot (l_{неп}^* + l_{зад}^*) + q_{неп}(-\dot{\varphi}_3 + \dot{\psi}_{неп}) \cdot (l_{неп}^* + l_{зад}^*)] \times \\ \times l_{неп}^* + N_1 \cdot a + N_2 \cdot (l_{зад}^* + a_1^*) - C_{хч} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) - q_{хч} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2).$$

Враховуючи, що $l_{неп}^* = l_{зад}^* = 0.5L_{БАЗ}$, та роблячи подальші перетворення, отримуємо:

$$I_{Z_3} \cdot \ddot{\varphi}_3 = 0.5L_{БАЗ}^2 \cdot [-(2 \cdot C_{зад} + C_{неп}) \cdot \varphi_3 + 2 \cdot C_{зад} \cdot \psi_{зад} + C_{неп} \cdot \psi_{неп} - \\ -(q_{неп} + q_{зад}) \cdot \dot{\varphi}_3 + q_{зад} \cdot \dot{\psi}_{зад} + q_{неп} \cdot \dot{\psi}_{неп}] + N_1 \cdot a + N_2 \cdot (l_{зад}^* + a_1^*) - \\ - C_{хч} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) - q_{хч} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2). \quad (2.71)$$

Рівняння обертального руху шасі відносно вертикальної осі y_3 (див. рис. 2.9):

$$I_{y_3} \cdot \ddot{\phi}'_3 = 2F_B^{(пер)} \cdot l_{пер} - 2F_B^{(зад)} \cdot (l_{зад} - H) + N_1 \cdot l_{ПЧ} + M'_{ПЧ} \quad (2.72)$$

Підставляючи в (2.72) значення бокових сил, пружного моменту та демпфіруючого моменту ПЧ, маємо:

$$I_{y_3} \ddot{\phi}'_3 = -2C_{БШ} [l_{пер}^2 + 2(l_{зад} - H)^2] \phi'_3 - 2q_{БШ} [l_{пер}^2 + 2(l_{зад} - H)^2] \dot{\phi}'_3 + N_1 l_{ПЧ} - C_{ПЧ} [\phi'_3 - \phi'_2 \cos(\theta_0 + \phi_2)] - q_{ПЧ} [\dot{\phi}'_3 - \dot{\phi}'_2 \cos(\theta_0 + \phi_2)], \quad (2.73)$$

Рівняння обертального руху шасі навколо осі x_3 :

$$I_{x_3} \cdot \ddot{\phi}''_3 = (N_3^{(Пр)} + N_3^{(Л)}) \cdot (l_{зад} - H) - (N_4^{(Пр)} + N_4^{(Л)}) \cdot l_{пер} - N_2 \cdot l_{пч}$$

Підставляючи в це рівняння вирази (2.57) маємо:

$$(N_3^{(Пр)} + N_3^{(Л)}) = 2C_{зад} \cdot [-2 \cdot y^{(3)} + \phi_3(l_{зад}^* - l_{пер}^*) - 2\phi_3''(l_{зад} - H) + \psi_{зад}(l_{пер}^* - l_{зад}^*) + 2\xi_{зад}] + q_{зад} \cdot [-2\dot{y}^{(3)} + \dot{\phi}_3(l_{зад}^* - l_{пер}^*) - 2\dot{\phi}_3''(l_{зад} - H) + \dot{\psi}_{зад}(l_{пер}^* - l_{зад}^*) + 2\dot{\xi}_{зад}],$$

якщо $l_{зад}^* = l_{пер}^*$, тоді

$$(N_3^{(Пр)} + N_3^{(Л)}) = 4C_{зад} [-y^{(3)} - \phi_3''(l_{зад} - H) + \xi_{зад}] + 2q_{зад} [-\dot{y}^{(3)} - \dot{\phi}_3''(l_{зад} - H) + \dot{\xi}_{зад}].$$

Використовуючи вирази (2.58), маємо:

$$(N_4^{(\dot{i}\dot{\delta})} + N_4^{(\ddot{E})}) = C_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}} [-2\dot{\delta}^{(3)} + \varphi_3(l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* - l_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}^*) + 2\varphi_3'' l_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}} + \Psi_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}(l_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* - l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}^*) + 2\xi_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}] + \\ + q_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}} [-2\dot{\delta}^{(3)} + \dot{\varphi}_3(l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* - l_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}^*) + 2\dot{\varphi}_3'' l_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}} + \dot{\Psi}_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}(l_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* - l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}^*) + 2\dot{\xi}_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}],$$

Якщо $l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* = l_{i\dot{\alpha}\dot{\delta}}^*$, тоді

$$(N_4^{(Pp)} + N_4^{(L)}) = 2C_{nep} [-y^{(3)} + \varphi_3'' l_{nep} + \xi_{nep}] + 2q_{nep} [-\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3'' l_{nep} + \dot{\xi}_{nep}].$$

В такому разі рівняння обертального руху шасі навколо осі x_3 має вигляд:

$$I_{x_3} \cdot \ddot{\varphi}_3 = \{4C_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}} \cdot [-y^{(3)} - \varphi_3''(l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}} - H) + \xi_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}] + 2q_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}} \cdot [-\dot{y}^{(3)} - \dot{\varphi}_3''(l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* - H) + \\ + \dot{\xi}_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}]\} \cdot (l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}} - H) - \{2C_{nep} \cdot [-y^{(3)} + \varphi_3'' \cdot l_{nep} + \xi_{nep}] + \\ + 2q_{nep} \cdot [-\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3'' \cdot l_{nep} + \dot{\xi}_{nep}]\} \cdot l_{nep} - N_2 \cdot l_{ПЧ}. \quad (2.74)$$

Канонічна форма рівняння (2.74):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\lambda} \cdot (I_{x_3})'' = \{4C_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}} \cdot [-y^{(3)} - \varphi_3''(l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}} - H) + \xi_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}] + 2q_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}} \cdot [-\dot{y}^{(3)} - \dot{\varphi}_3''(l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* - H) + \\ + \dot{\xi}_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}]\} \cdot (l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}} - H) - \{2C_{nep} \cdot [-y^{(3)} + \varphi_3'' \cdot l_{nep} + \xi_{nep}] + 2q_{nep} \cdot [-\dot{y}^{(3)} + \\ + \dot{\varphi}_3'' \cdot l_{nep} + \dot{\xi}_{nep}]\} \cdot l_{nep} - (N_2)'' \cdot l_{nep}; \\ \dot{\varphi}_3'' = \lambda, \end{array} \right.$$

$$\text{де } (I_{x_3})'' = I_{x_3} - m^* \cdot \bar{m} \cdot l_{ПЧ}^2,$$

$$(N_2)'' = -m^* \cdot \{ \bar{m} \cdot [A_3 + (l_{\zeta\dot{\alpha}\dot{\delta}}^* + a_1^*) \cdot \ddot{\varphi}_3] + k_m \cdot \ddot{\varphi} + \bar{k}_m \cdot \dot{\varphi}^2 + P \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) \}.$$

Складемо систему диференціальних рівнянь руху частин ПУ, ввівши до її складу рівняння обертального руху ХЧ (2.66) та ПЧ (2.68) напрямної, рівняння руху центра мас шасі (2.59) та (2.63), рівняння обертального руху шасі (2.71),

(2.73) та (2.74). Надамо системі вигляду системи рівнянь першого порядку, ввівши для цього необхідні проміжні змінні.

$$\left. \begin{aligned}
 &1. [I_{Z_2} + m^* \cdot (x_k \cdot k_m - y_k \cdot \bar{k}_m)] \cdot \dot{\varepsilon} = P \cdot [x_p \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - y_p \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2)] - \\
 &\quad - C_{\tilde{O}_x}(\varphi_2 - \varphi_3) - y_k \cdot \tilde{N}_1 + x_k \cdot \tilde{N}_2 - q_{\tilde{O}_x} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2); \\
 &2. \dot{\varphi}_2 = \varepsilon; \\
 &3. I_{y_2} \cdot \dot{\pi} = P \cdot A_i - C_{\tilde{I}_x} \cdot [\varphi_2' \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \varphi_3'] \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \\
 &\quad - q_{\tilde{I}_x} \cdot [\dot{\varphi}_2' \cdot \cos(\theta_0 + \dot{\varphi}_2) - \dot{\varphi}_3'] \cdot \cos(\theta_0 + \dot{\varphi}_2); \\
 &4. \dot{\varphi}_2' = \pi; \\
 &5. m_3 \cdot \dot{\zeta} = -N_1 - 6C_{A\phi} \cdot x^{(3)} + 2C_{A\phi} \varphi_3' \cdot [(l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - 2H) + l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - l_{i\ddot{a}\ddot{d}}] - \\
 &\quad - 6q_{A\phi} \cdot \dot{x}^{(3)} + 2q_{A\phi} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot [(l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - 2H) + l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - l_{i\ddot{a}\ddot{d}}]; \\
 &6. \dot{x}^{(3)} = \zeta; \\
 &7. m_3 \cdot \dot{\eta} = -N_2 - \tilde{C}_1 \cdot y^{(3)} + \tilde{C}_3 \cdot \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} + \tilde{C}_4 \cdot \xi_{i\ddot{a}\ddot{d}} + \tilde{C}_5 \cdot \varphi_3'' - \\
 &\quad - \tilde{Q}_1 \cdot \dot{y}^{(3)} + \tilde{Q}_3 \cdot \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{d}} + \tilde{Q}_4 \cdot \dot{\xi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} + \tilde{Q}_5 \cdot \dot{\varphi}_3''; \\
 &8. \dot{y}_3 = \eta; \\
 &9. [I_{Z_3} + m^* \cdot \bar{m} \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}^* + \dot{a}_1^*)^2] \cdot \dot{\mu} = 0.5 \cdot L_{AA\zeta}^2 \cdot [-(2 \cdot C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} + C_{i\ddot{a}\ddot{d}}) \cdot \varphi_3 + 2 \cdot C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \times \\
 &\quad \times \psi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} + C_{i\ddot{a}\ddot{d}} \cdot \psi_{i\ddot{a}\ddot{d}} - (q_{i\ddot{a}\ddot{d}} + q_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}) \cdot \dot{\varphi}_3 + q_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} + q_{i\ddot{a}\ddot{d}} \cdot \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{d}}] + \\
 &\quad + N_1 \cdot a + N_2^* \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}^* + a_1^*) - C_{\tilde{O}_x} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) - q_{\tilde{O}_x} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2); \\
 &10. \dot{\varphi}_3 = \mu; \\
 &11. I_{y_3} \dot{\xi} = -2C_{A\phi} [l_{i\ddot{a}\ddot{d}}^2 + 2(l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H)^2] \varphi_3' - 2q_{A\phi} [l_{i\ddot{a}\ddot{d}}^2 + 2(l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H)^2] \dot{\varphi}_3' + \\
 &\quad + N_1 l_{\tilde{I}_x} - C_{\tilde{I}_x} [\varphi_3' - \varphi_2' \cos(\theta_0 + \varphi_2)] - q_{\tilde{I}_x} [\dot{\varphi}_3' - \dot{\varphi}_2' \cos(\theta_0 + \varphi_2)]; \\
 &12. \dot{\varphi}_3' = \xi; \\
 &13. (I_{x_3})'' \cdot \dot{\lambda} = \{4C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot [-\dot{\sigma}^{(3)} - \varphi_3''(l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H) + \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}] + 2q_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot [-\dot{\sigma}^{(3)} - \varphi_3''(l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - \\
 &\quad - H) + \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}]\} \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H) - \{2C_{i\ddot{a}\ddot{d}} \cdot [-\dot{\sigma}^{(3)} + \varphi_3'' \cdot l_{i\ddot{a}\ddot{d}} + \xi_{i\ddot{a}\ddot{d}}] + \\
 &\quad + 2q_{i\ddot{a}\ddot{d}} \cdot [-\dot{\sigma}^{(3)} + \varphi_3'' \cdot l_{i\ddot{a}\ddot{d}} + \xi_{i\ddot{a}\ddot{d}}]\} \cdot l_{i\ddot{a}\ddot{d}} - (N_2)'' \cdot l_{i\ddot{a}\ddot{d}}, \\
 &14. \dot{\varphi}_3'' = \lambda; \\
 &15. m_n \dot{\eta}_n = 2(C_{i\ddot{a}\ddot{d}}(y^{(3)} + \varphi_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{d}} - \xi_{i\ddot{a}\ddot{d}}) + q_{i\ddot{a}\ddot{d}}(\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{d}} - \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{d}}) - C_\phi \xi_{i\ddot{a}\ddot{d}} - q_\phi \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{d}}); \\
 &16. \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{d}} = \eta_n; \\
 &17. m_c \cdot \dot{\eta}_c = 2C_{cep} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3'' \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - 2H) - \xi_{cep}] - 2C_\phi \cdot \xi_{cep} - 2q_\phi \cdot \dot{\xi}_{cep}; \\
 &18. \dot{\xi}_{cep} = \eta_c; \\
 &19. m_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \dot{\eta}_3 = 2C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3'' \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H) - \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}] - 2C_\phi \cdot \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - 2q_\phi \cdot \dot{\xi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}; \\
 &20. \dot{\xi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = \eta_3; \\
 &21. I_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \dot{\alpha} = 0.5(C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} L_{AA\zeta}^2(\varphi_3 - \psi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}) + q_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} L_{AA\zeta}^2(\dot{\varphi}_3 - \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}) - C_\phi S_{AA\zeta}^2 \psi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - q_\phi S_{AA\zeta}^2 \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}); \\
 &22. \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = \alpha; \\
 &23. I_{i\ddot{a}\ddot{d}} \dot{\beta} = 0.5(C_{i\ddot{a}\ddot{d}} L_{AA\zeta}^2(\varphi_3 - \psi_{i\ddot{a}\ddot{d}}) + q_{i\ddot{a}\ddot{d}} L_{AA\zeta}^2(\dot{\varphi}_3 - \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{d}}) - C_\phi S_{AA\zeta}^2 \psi_{i\ddot{a}\ddot{d}} - q_\phi S_{AA\zeta}^2 \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{d}}); \\
 &24. \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{d}} = \beta,
 \end{aligned} \right. \quad (2.75)$$

де

$$\tilde{N}_1 = m^* \cdot \{ k_m \cdot \dot{\varphi}_2^2 - P \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \frac{\bar{m}}{m_3} [6C_{БШ} \cdot x^{(3)} - 2C_{БШ} \cdot \varphi_3' \cdot (2l_{зад} - 2H - l_{пер}) + ; \\ + 6q_{БШ} \cdot \dot{x}^{(3)} - 2q_{БШ} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot (2l_{зад} - 2H - l_{пер})] \}$$

$$\tilde{N}_2 = -m^* \cdot \{ \bar{m} \cdot [\tilde{A}_3 + \ddot{\varphi}_3 \cdot (l_{зад}^* + a_1^*) + \ddot{\varphi}_3'' \cdot l_{нч}] + \bar{k}_m \cdot \dot{\varphi}_2^2 + P \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2) \};$$

$$N_2^* = -m^* \cdot [\bar{m} \cdot [\tilde{A}_3 + \ddot{\varphi}_3'' \cdot l_{нч}] + k_m \cdot \ddot{\varphi}_2 + \bar{k}_m \cdot \dot{\varphi}_2^2 + P \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2)];$$

$$\tilde{A}_3 = \frac{1}{m_3} \cdot (\tilde{C}_1 \cdot y^{(3)} - \tilde{C}_3 \cdot \xi_{зад} - \tilde{C}_4 \cdot \xi_{пер} - \tilde{C}_5 \cdot \varphi_3'' + Q_1 \cdot \dot{y}^{(3)} - Q_3 \cdot \dot{\xi}_{пер} - \tilde{Q}_4 \cdot \dot{\xi}_{зад} - \tilde{Q}_5 \cdot \dot{\varphi}_3'');$$

$$\tilde{C}_1 = 4C_{зад} + 2C_{пер}; \quad \tilde{C}_3 = 4C_{зад}; \quad \tilde{C}_4 = 2C_{пер};$$

$$\tilde{C}_5 = 2C_{пер} \cdot l_{пер} - 4C_{зад} \cdot (l_{зад} - H);$$

$$\tilde{Q}_1 = 2q_{зад} + 2q_{пер}; \quad \tilde{Q}_3 = 2q_{пер}; \quad \tilde{Q}_4 = 4q_{зад};$$

$$\tilde{Q}_5 = 2q_{пер} \cdot l_{пер} - 2q_{зад} \cdot (l_{зад} - H);$$

I_{z_2}, I_{y_2} – моменти інерції ХЧ та ПЧ напрямної разом зі снарядом відносно осей z_2 та y_2 відповідно; $I_{z_3}, I_{y_3}, I_{x_3}$ – моменти інерції підресореної частини ПУ (шасі); $I_{зад}, I_{пер}$ – моменти інерції заднього та переднього мостів.

Всі інші величини, вирази для яких не наведені в даному розділі, обчислюються за попередніми залежностями для системи рівнянь (2.19), що наводяться в розділі 2.1.1.

2.2.2 Ділянка відносного поступального руху РС по напрямній ПУ

Для складання рівнянь руху на зазначеній ділянці, використаємо розрахункову схему, що приведена на рис. 2.15. У зв'язку з тим, що на розрахунковій схемі збережені всі попередні позначення, систему рівнянь на даній ділянці можливо скласти, використавши більшу частину попередніх рівнянь. Перші чотири рівняння візьмемо з системи (2.32). Вони відповідають руху снаряда відносно напрямної та обертальному руху напрямної відносно вісі z_2 . Інші рівняння можна отримати з системи рівнянь (2.75), врахувавши наявність бокової сили взаємодії між снарядом і напрямною та динамічну реакцію гвинтового пазу. Будемо вважати, що лінія дії бокової сили взаємодії \bar{R}_i проходить через центр мас снаряда (рис. 2.15) і чисельно \bar{R}_i дорівнює додатку переносної та коріолісової сил інерції маси снаряда, тобто:

$$R_i = 2\dot{\phi}'_2 \cdot \dot{x}_1^{(1)} \cdot m_1 + \ddot{\phi}'_2 \cdot (l_1 + x_1^{(1)} - l_0) \cdot m_1 \quad (2.76)$$

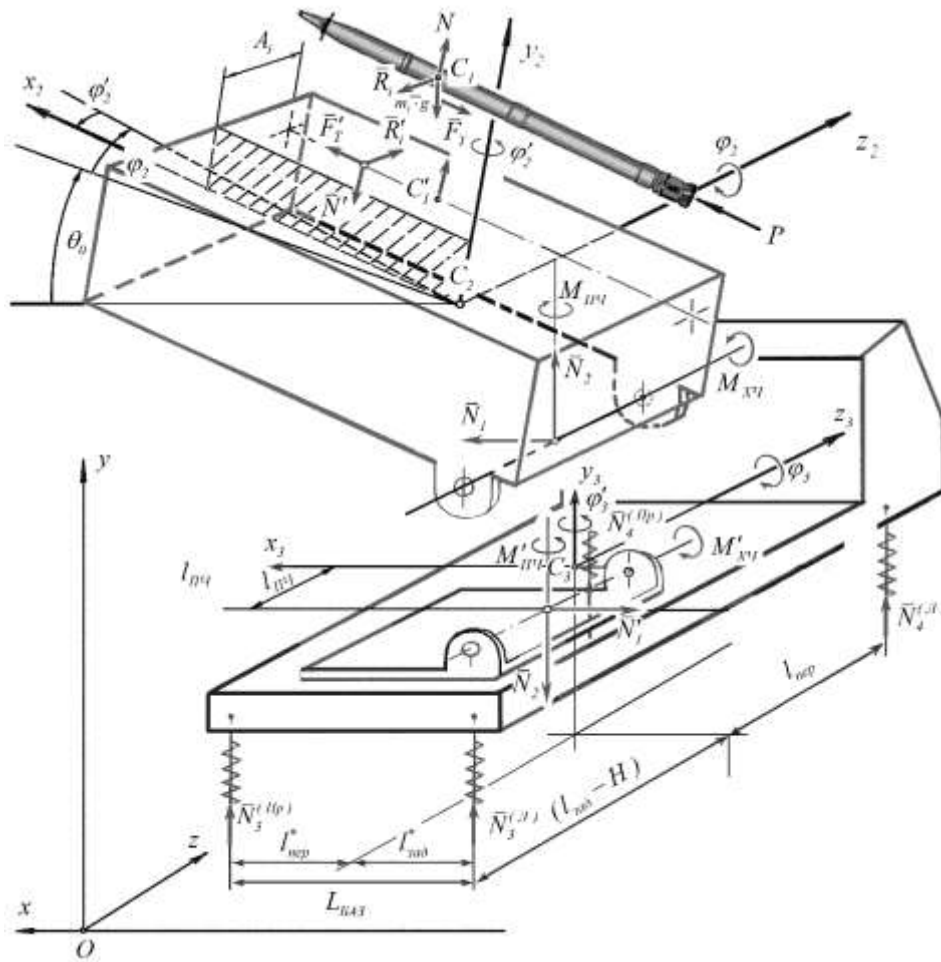


Рисунок 2.15 - Розрахункова схема при курсовому повороті пакету напрямних

Більшість величин, які входять до системи рівнянь обчислюються за залежностями, що по формі подібні залежностям системі рівнянь (2.32) та наведені в розділі 2.2.1. Виняток складають коефіцієнти лівої частини рівняння (2.59), що наведені у попередньому розділі, а також величина \tilde{A}_3 , на яку необхідно змінити A_3 у відповідних місцях залежностей системи (2.32). Вираз для \tilde{A}_3 теж береться з попереднього розділу.

Під час руху РС по трубчатій напрямній, яка з метою надання снаряду провертання споряджена гвинтовим пазом, між ведучим штифтом снаряда та боковою гранню пазу відбувається взаємодія (рис 2.16). Сила тиску штифта на напрямну спрямована перпендикулярно до бічної грані пазу і змінює свій напрям в просторі в залежності від кута повороту снаряда φ .

Силу тиску \bar{P}' , що дорівнює відповідній реакції \bar{N} , отримаємо розклавши силу тяги двигуна \bar{P} на складові \bar{P}' та \bar{P}'' :

$$P' = P \cdot \sin \alpha_{\Pi}; \quad P'' = P \cdot \cos \alpha_{\Pi} \quad (2.77)$$

Кут провороту снаряда на напрямній слід шукати за залежністю:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{S \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\Pi}}{r} \quad (2.78)$$

де θ_0 – початковий кут повороту; α_{Π} – кут нахилу гвинтового пазу; r – відстань від вісі снаряда до центру ведучого штифта; S – переміщення снаряда.

Кут нахилу гвинтового пазу знайдемо таким чином:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\Pi} = \frac{r \cdot \varphi_{\Pi}}{L},$$

де φ_{Π} – повний кут повороту гвинтової лінії; L – довжина напрямної.

Знайдемо проекції сили дії штифта снаряда на напрямну на осі системи координат $\{x_H, y_H, z_H\}$, що пов'язана з конкретною трубою напрямної, по якій рухається снаряд.

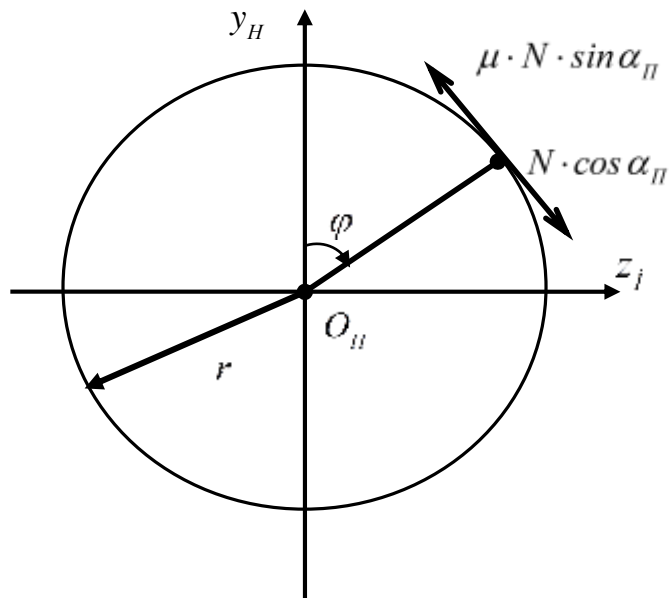
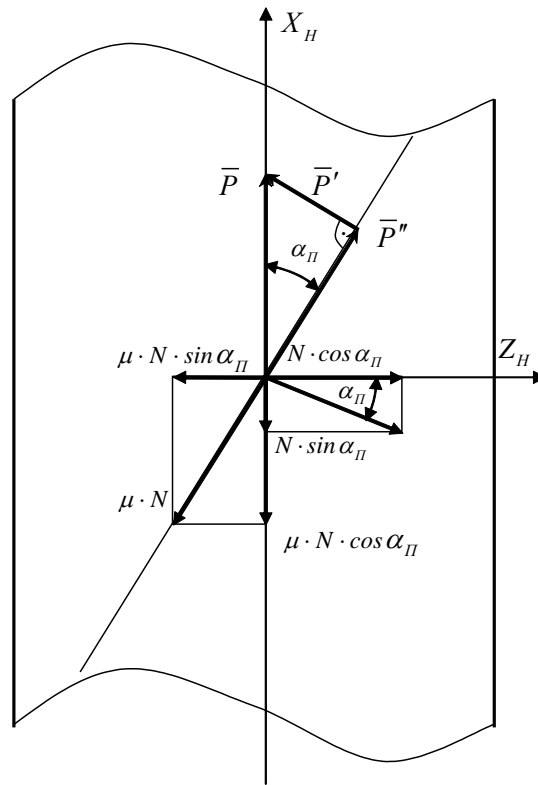


Рисунок 2.16 - До визначення реакції гвинтового пазу

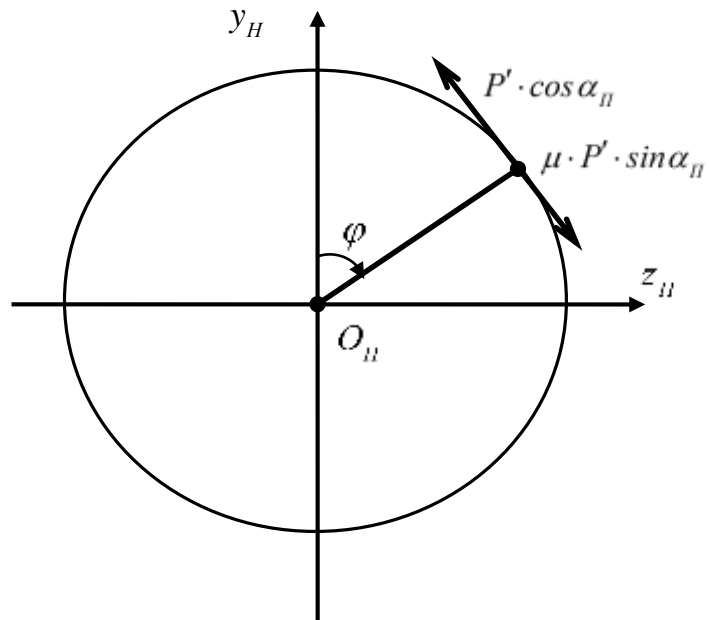
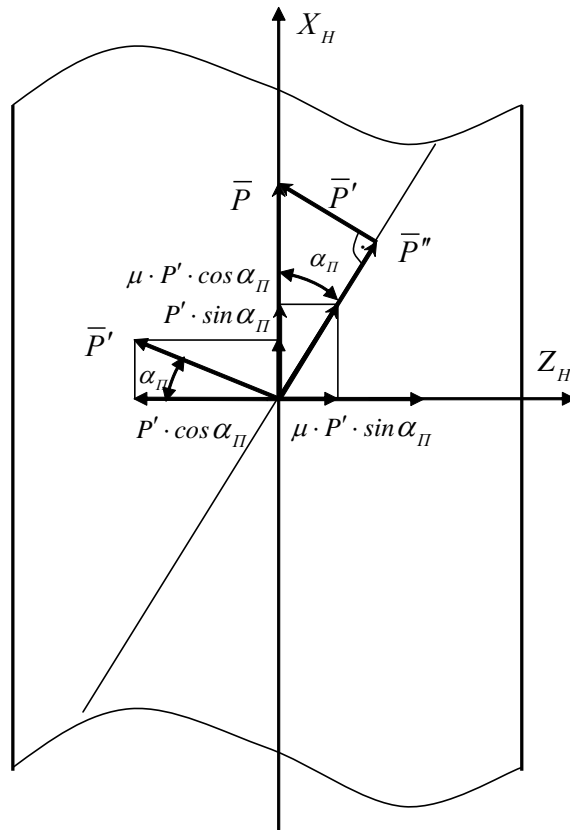


Рисунок 2.17 - До визначення дії штифта на стінку гвинтового пазу

$$\text{Вісь } x_H: P' \cdot \sin \alpha + \mu \cdot P' \cdot \cos \alpha_{II} = P \cdot (\sin^2 \alpha_{II} + \mu \cdot \sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II}).$$

$$\text{Вісь } y_H: P \cdot (\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \sin \varphi.$$

$$\text{Вісь } z_H: P \cdot (-\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} + \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \cos \varphi.$$

де μ – коефіцієнт тертя між штифтом та пазом.

Моменти сили дії штифта на напрямну відносно пов'язаних з напрямною осей y_2 та z_2 знайдемо по її проекціям на вісі $\{x_H, y_H, z_H\}$ та по координатам точок прикладення:

$$\begin{cases} m_{y_2} = A_i \cdot P \cdot (\sin^2 \alpha_{II} + \mu \cdot \sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II}) - \\ \quad - (x_1^{(1)} - l_2) \cdot P \cdot (\mu \cdot \sin^2 \alpha_{II} - \sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II}) \cos \varphi; \\ m_{z_2} = (x_1^{(1)} - l_2) \cdot P \cdot (\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \sin \varphi - \\ \quad - b_1^{(i)} \cdot P \cdot (\sin^2 \alpha_{II} + \mu \cdot \sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II}). \end{cases} \quad (2.79)$$

Залежності (2.79) відповідають ділянці поступального руху снаряду відносно напрямної. При відносному складному русі множник $(x_1^{(1)} - l_2)$ слід замінити на $(x_1^{(1)} + L - l_1 - l_2)$.

Якщо враховувати дію штифта снаряда на напрямну, то при цьому складові реакції шарнірної в'язі шасі з напрямною отримають доданки:

$$\text{Складова } N_1: -P \cdot (\sin^2 \alpha_{II} + \mu \cdot \sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II}) \cdot \cos \theta_0 \quad (2.80)$$

$$\text{Складова } N_2: -P \cdot (\sin^2 \alpha_{II} + \mu \cdot \sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II}) \cdot \sin \theta_0,$$

де θ_0 – кут прицілювання.

Тепер визначимо складові реакції гвинтового пазу, що діють на снаряд. Їх проекції на вісі $\{x_H, y_H, z_H\}$ визначимо такими залежностями.

$$\begin{aligned}
\text{Вісь } x_H: & -P \cdot (\sin^2 \alpha_{II} + \mu \cdot \sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II}), \\
\text{Вісь } y_H: & -P \cdot (\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \sin \varphi, \\
\text{Вісь } z_H: & -P \cdot (-\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} + \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \cos \varphi.
\end{aligned} \tag{2.81}$$

Перша з цих складових повинна бути врахована в рівнянні поступального руху снаряда по напрямній та в рівнянні руху його центра мас на останній ділянці (ділянці відносного складного руху).

Що стосується двох останніх складових, то їх дію на рух снаряда слід враховувати на ділянці складного руху РС. При цьому рівняння обертального руху снаряда у вертикальній площині отримує в правій частині момент, що визначається складовою реакції вздовж осі y_H . Рівняння за аналогією рівняння (3) системи (2.45) набуває вигляду:

$$\bar{I}_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = -R \cdot \bar{L} \cdot (\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \sin \varphi \cdot l_1 \tag{2.82}$$

Рівняння руху снаряда у боковому напрямку з урахуванням реакції гвинтового пазу та сили тертя, що виникає в опорній точці дульного зрізу напрямної при примусовому провертанні РС гвинтовим пазом буде мати вигляд:

$$I'_{C_1} \cdot \ddot{\varphi}'_1 = -R_i \cdot l_1 + F'_T \cdot x_1^{(1)} + P \cdot (\sin \alpha_{II} \cdot \cos \alpha_{II} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{II}) \cdot \cos \varphi \cdot l_1 \tag{2.83}$$

де $F'_T = \mu \cdot N$; μ – коефіцієнт тертя; N – реакція в опорній точці; $x_1^{(1)}$ – координата центру мас РС, що відраховується від дульного зрізу напрямної; I'_{C_1} – екваторіальний момент інерції снаряда; R_i – складова динамічної реакції напрямної, що визначається обертальним рухом напрямної в боковому

напрямку і прикладена на ведучому штифті.

Вважаючи, що R_i чисельно дорівнює головному вектору коріолісових та переносних сил інерції, визначимо її таким чином:

$$R_i = m_1 \cdot [2\dot{\varphi}'_2 \cdot \dot{x}_1^{(1)} + \ddot{\varphi}'_2 \cdot (l_1 - l_0 + \dot{x}_1^{(1)})] \quad (2.84)$$

де m_1 – маса снаряду; l_1, l_0 – характерні довжини напрямної.

Система рівнянь, що відповідає відносній поступальній ділянці руху снаряда по напрямній у випадку напрямної з гвинтовим пазом має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1. m_1 \cdot \dot{q} = -m_1 \cdot g \cdot [\sin(\theta_0 + \varphi_2) + \mu \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2)] + P + f_{\ddot{a}\ddot{a}} \cdot [\cos\psi + \mu \cdot \sin\psi] + f_{\ddot{a}\ddot{o}} \cdot [\sin\psi - \mu \cdot \cos\psi] + (f'_3 - f_3) \cdot \sin(\theta_0 + \varphi_2) + \mu \cdot (f'_3 - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - P \cdot (\sin^2 \alpha_i + \mu \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i); \\ 2. \dot{x}_1^{(1)} = q; \\ 3. I_2^* \cdot \dot{\varepsilon} = -(N)^* \bar{l} + x_*^{(k)} (N_2)^* \cdot y_*^{(k)} (N_1)^* - C_{\ddot{o}\times} (\varphi_2 - \varphi_3) - N_0 \cos(\theta_0 + \varphi_2) \times \\ \times (l_2 - l_1) - N_0 \sin(\theta_0 + \varphi_2) b_1 - q_{\ddot{o}\times} (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) + P (x_1^{(1)} - l_2) \times \\ \times (\sin \alpha_i \cos \alpha_i - \mu \sin^2 \alpha_i) \sin \varphi - b_1^{(i)} P (\sin^2 \alpha_i + \mu \sin \alpha_i \cos \alpha_i); \\ 4. \dot{\varphi}_2 = \varepsilon; \\ 5. \tilde{I}_{y_2} \cdot \dot{\pi} = -\tilde{R}_i \tilde{l}_* + N_0 \sin(\theta_0 + \varphi_2) A_i - C_{i \times} [\varphi'_2 \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \varphi'_3] \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \\ - q_{i \times} [\dot{\varphi}'_2 \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \dot{\varphi}'_3] \cos(\theta_0 + \varphi_2) + N \mu A_i + A_i P (\sin^2 \alpha_i + \\ + \mu \sin \alpha_i \cos \alpha_i) - (x_1^{(1)} - l_2) P (\mu \sin^2 \alpha_i - \sin \alpha_i \cos \alpha_i) \cos \varphi; \\ 6. \dot{\varphi}'_2 = \pi; \\ 7. m_3 \cdot \dot{\zeta} = -N_1 - 6C_{\ddot{A}\ddot{O}} x^{(3)} + 2C_{\ddot{A}\ddot{O}} \varphi'_3 [(l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - 2H) + l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - l_{i\ddot{a}\ddot{o}}] - 6q_{\ddot{A}\ddot{O}} \dot{x}^{(3)} + \\ + 2q_{\ddot{A}\ddot{O}} \dot{\varphi}'_3 [(l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - 2H) + l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - l_{i\ddot{a}\ddot{o}}]; \\ 8. \dot{x}^{(3)} = \zeta; \\ 9. m_3 \cdot \dot{\eta} = -N_2 - \tilde{C}_1 y^{(3)} + \tilde{C}_3 \xi_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} + \tilde{C}_4 \xi_{i\ddot{a}\ddot{o}} + \tilde{C}_5 \varphi_3'' - \tilde{Q}_1 \dot{y}^{(3)} + \tilde{Q}_3 \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{o}} + \tilde{Q}_4 \dot{\xi}_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} + \tilde{Q}_5 \dot{\varphi}_3'' \\ 10. \dot{y}_3 = \eta; \\ 11. [I_{z_3} + m^* \bar{m} (l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}}^* + \dot{a}_1^*)^2] \dot{\mu} = 0.5 L_{\ddot{A}\ddot{A}\ddot{C}}^2 [-(2C_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} + C_{i\ddot{a}\ddot{o}}) \varphi_3 + 2C_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} \psi_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} + C_{i\ddot{a}\ddot{o}} \psi_{i\ddot{a}\ddot{o}} - (q_{i\ddot{a}\ddot{o}} + q_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}}) \times \\ \times \dot{\varphi}_3 + q_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} \dot{\psi}_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} + q_{i\ddot{a}\ddot{o}} \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{o}}] + N_1 a + N_2^* (l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}}^* + a_1^*) - C_{\ddot{o}\times} (\varphi_3 - \varphi_2) - q_{\ddot{o}\times} (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2); \\ 12. \dot{\varphi}_3 = \mu; \\ 13. I_{y_3} \cdot \dot{\xi} = -2C_{\ddot{A}\ddot{O}} \cdot [l_{i\ddot{a}\ddot{o}}^2 + 2 \cdot (l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - H)^2] \cdot \varphi'_3 - 2q_{\ddot{A}\ddot{O}} \cdot [l_{i\ddot{a}\ddot{o}}^2 + 2 \cdot (l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - H)^2] \cdot \dot{\varphi}'_3 + \\ + N_1 \cdot l_{i \times} - C_{i \times} \cdot [\varphi'_3 - \varphi'_2 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2)] - q_{i \times} \cdot [\dot{\varphi}'_3 - \dot{\varphi}'_2 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2)]; \\ 14. \dot{\varphi}'_3 = \xi; \\ 15. (I_{x_3})'' \cdot \dot{\lambda} = 2\{2C_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} [-\delta^{(3)} - \varphi_3'' (l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - H) + \xi_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}}] + q_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} [-\delta^{(3)} - \dot{\varphi}_3'' (l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - H) + \dot{\xi}_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}}]\} \times \\ \times (l_{\ddot{c}\ddot{a}\ddot{a}} - H) - 2\{C_{i\ddot{a}\ddot{o}} [-\delta^{(3)} + \varphi_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{o}} + \xi_{i\ddot{a}\ddot{o}}] + q_{i\ddot{a}\ddot{o}} [-\delta^{(3)} + \dot{\varphi}_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{o}} + \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{o}}]\} l_{i\ddot{a}\ddot{o}} - (N_2)'' l_{i\ddot{a}\ddot{o}}; \\ 16. \dot{\varphi}_3'' = \lambda; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
17. m_n \cdot \dot{\eta}_n = 2\{C_{i\ddot{a}\ddot{a}}(y^{(3)} + \varphi_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{a}} - \xi_{i\ddot{a}\ddot{a}}) + q_{i\ddot{a}\ddot{a}}(\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{a}} - \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}) - C_\phi \xi_{i\ddot{a}\ddot{a}} - q_\phi \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}\}; \\
18. \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{a}} = \eta_n; \\
19. m_c \cdot \dot{\eta}_c = 2\{C_{cep} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3'' \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - 2H) - \xi_{cep}] - C_\phi \cdot \xi_{cep} - q_\phi \cdot \dot{\xi}_{cep}\}; \\
20. \dot{\xi}_{cep} = \eta_c; \\
21. m_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \dot{\eta}_3 = 2\{C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3'' \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H) - \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}] - C_\phi \cdot \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - q_\phi \cdot \dot{\xi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}\}; \\
22. \dot{\xi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = \eta_3; \\
23. I_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \dot{\kappa} = 0.5\{C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} L_{AA\zeta}^2(\varphi_3 - \psi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}) + q_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} L_{AA\zeta}^2(\dot{\varphi}_3 - \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}) - C_\phi S_{AA\zeta}^2 \psi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - q_\phi S_{AA\zeta}^2 \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}\}; \\
24. \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = \kappa; \\
25. I_{i\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \dot{\beta} = 0.5\{C_{i\ddot{a}\ddot{a}} L_{AA\zeta}^2(\varphi_3 - \psi_{i\ddot{a}\ddot{a}}) + q_{i\ddot{a}\ddot{a}} L_{AA\zeta}^2(\dot{\varphi}_3 - \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}) - C_\phi S_{AA\zeta}^2 \psi_{i\ddot{a}\ddot{a}} - q_\phi S_{AA\zeta}^2 \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}\}; \\
26. \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{a}} = \beta,
\end{array} \right. \quad (2.85)$$

$$\text{де } \tilde{R}_i = 2\dot{\varphi}_2' \cdot \dot{x}_1^{(1)} m_1; \quad \tilde{I}_{Y_2} = I_{Y_2} + m_1 \cdot \bar{l} \cdot \tilde{l}_*;$$

$$\begin{aligned}
x_*^{(k)} &= -l_2 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + l_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi), \\
y_*^{(k)} &= -l_2 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + l_0 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi);
\end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
f_3 &= m_1 \cdot \ddot{y}^{(3)}; & f_3' &= m_1 \cdot [\ddot{\varphi}_3(l_{3a\ddot{a}} + a_1) - \ddot{\varphi}_3'' \cdot l_{n\varphi}]; \\
f_{\text{сi}\ddot{a}\ddot{a}} &= m_1 \cdot (KC_1) \cdot \dot{\varphi}^2; & f_{\text{доm}} &= m_1 \cdot (KC_1) \cdot \ddot{\varphi};
\end{aligned} \right\}$$

$$\tilde{l}_* = l_1 + x_1^{(1)} - l_2 - \mu \cdot A_i; \quad \bar{l} = l_1 + x_1^{(1)} - l_0;$$

$$N = m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - f_{\text{сi}\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \sin\psi + f_{\text{доm}} \cdot \cos\psi - (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi);$$

$$(N)^* = m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) - f_{\text{сi}\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \sin\psi - (f_3' - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi);$$

$$\begin{aligned}
N_1 &= m_1^* \{-N[\mu \cos(\theta_0 + \varphi) + \sin(\theta_0 + \varphi)] - m_2 D \ddot{\varphi}_2 - P(\sin^2 \alpha_{\Pi} + \mu \sin \alpha_{\Pi} \cos \alpha_{\Pi}) \times \\
&\quad \times \cos \theta_0 + m_2 C \dot{\varphi}^2 - \frac{m_2}{m_3} [6C_{\text{БШ}} x^{(3)} - 2C_{\text{БШ}} \varphi_3' (2l_{3a\ddot{a}} - 2H - l_{\text{неp}}) + 6q_{\text{БШ}} \dot{x}^{(3)} - \\
&\quad - 2q_{\text{БШ}} \dot{\varphi}_3' (2l_{3a\ddot{a}} - 2H - l_{\text{неp}})]\};
\end{aligned}$$

$$(N_1)^* = m_1^* \{ -(N)^* [\mu \cos(\theta_0 + \varphi) + \sin(\theta_0 + \varphi)] - P(\sin^2 \alpha_{II} + \mu \sin \alpha_{II} \cos \alpha_{II}) \times \\ \times \cos \theta_0 + m_2 C \dot{\varphi}^2 - \frac{m_2}{m_3} [6C_{БШ} x^{(3)} - 2C_{БШ} \dot{\varphi}'_3 (2l_{зад} - 2H - l_{неп}) + 6q_{БШ} \dot{x}^{(3)} - \\ - 2q_{БШ} \dot{\varphi}'_3 (2l_{зад} - 2H - l_{неп})] \};$$

$$N_2 = -m_1^* \{ N_0 + N [\mu \sin(\theta_0 + \varphi) + \cos(\theta_0 + \varphi)] + m_2 D \dot{\varphi}^2 + m_2 [\tilde{A}_3 + (l_{зад} + \\ + a_1) \ddot{\varphi}_3 + \ddot{\varphi}'' l_{нч}] + m_2 C \ddot{\varphi} - P(\sin^2 \alpha_{II} + \mu \sin \alpha_{II} \cos \alpha_{II}) \sin \theta_0 \};$$

$$(N_2)^* = -m_3^* \{ N_0 + (N)^* [\mu \sin(\theta_0 + \varphi) + \cos(\theta_0 + \varphi)] + m_2 D \dot{\varphi}^2 + \\ + m_2 [\tilde{A}_3 + (l_{зад} + a_1) \ddot{\varphi}_3 + \ddot{\varphi}'' l_{нч}] - P(\sin^2 \alpha_{II} + \mu \sin \alpha_{II} \cos \alpha_{II}) \sin \theta_0 \};$$

$$I_2^* = I_{C_2} + m_1 (KC_1) \cos \psi \bar{l} + m_1^* m_2 (C x_*^{(k)} - D y_*^{(k)}) + m_1^* m_1 (KC_1) \cos \psi \times \\ \times [\sin(\theta_0 + \varphi) (\mu x_*^{(k)} - y_*^{(k)}) + \cos(\theta_0 + \varphi) (x_*^{(k)} - \mu y_*^{(k)})];$$

2.2.3 Ділянка відносного складного руху РС по напрямній ПУ

Як вже вказувалося в розділі 2.1.3, після проходження центром ваги снаряда дульного зрізу напрямної створюються умови для надання снаряду додаткового обертального руху. У разі площинної моделі руху, представленій малюнком на рис. 2.8, це обертання відбувається у вертикальній площині при спіранні снаряда на крайню точку напрямної (точку дульного зрізу). В розділі 2.1.3 наведена відповідна система диференціальних рівнянь, що відображає рух окремих частин ПУ на зазначеній ділянці.

При стрільбі з розворотом напрямної та одночасним врахуванням конкретного положення снаряда на напрямній, модель набуває просторового характеру (рис. 2.15).

Для складання диференціальних рівнянь руху окремих частин системи «снаряд–ПУ» на ділянці відносного складного руху РС по напрямній ПУ використаємо існуючі попередні розрахункові моделі (рис. 2.8, рис. 2.15). З площинної моделі руху (рис. 2.8) візьмемо перші два рівняння. Вони наведені в

системі рівнянь (2.45) і визначають рух центра мас снаряда відносно напрямної. Додамо до правої частини першого з них відповідну складову реакції гвинтового пазу (2.81).

Наступними рівняннями руху будуть рівняння (2.82) і (2.83) обертального руху снаряда. Кожне з них дасть два диференціальних рівняння першого порядку. Таким чином, утворюється шість рівнянь першого порядку. Наступними рівняннями будуть рівняння обертального руху напрямної відносно осей y_2 та z_2 . Перше з цих рівнянь утворимо на підставі рівняння (5) системи рівнянь (2.45), додавши до його правої частини момент m_{z_2} реакції гвинтового пазу за залежністю (2.79). Рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{Z_2} \varphi_2 = & -\bar{N} \tilde{l} + x_*^{(k)} \bar{N}_2 - y_*^{(k)} \bar{N}_1 - C_{xq} (\varphi_2 - \varphi_3) - N_0 \cos(\theta_0 + \varphi_2) (l_2 - l_1) - \\ & - N_0 \sin(\theta_0 + \varphi_2) b_1 - q_{xq} (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + (x_1^{(1)} + L - l_1 - l_2) P (\sin \alpha_{II} \cos \alpha_{II} - \\ & - \mu \sin^2 \alpha_{II}) \sin \varphi - b_1^{(i)} P (\sin^2 \alpha_{II} + \mu \sin \alpha_{II} \cos \alpha_{II}). \end{aligned} \quad (2.86)$$

Всі попередні позначення величин з рівняння (5) системи (2.45) збережені за виключенням \bar{I}_2 яке замінено на \bar{I}_{Z_2} ($\bar{I}_2 = \bar{I}_{Z_2}$).

Рівняння обертального руху напрямної відносно осі y_2 (в боковому напрямку) отримаємо на підставі рівняння (5) системи рівнянь (2.85) провівши необхідні незначні заміни. Рівняння буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{y_2} \ddot{\varphi}_2 = & -\tilde{R}_i \tilde{l}_* + N_0 \sin(\theta_0 + \varphi_2) A_i - C_{pq} [\varphi_2' \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \varphi_3'] \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \\ & - q_{pq} \times [\dot{\varphi}_2' \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \dot{\varphi}_3'] \cos(\theta_0 + \varphi_2) + N \mu A_i + A_i P (\sin^2 \alpha_{II} + \\ & + \mu \sin \alpha_{II} \cos \alpha_{II}) - (x_1^{(1)} + L - l_1 - l_2) \times P (\mu \sin^2 \alpha_{II} - \sin \alpha_{II} \cos \alpha_{II}) \cos \varphi; \end{aligned} \quad (2.87)$$

де $\tilde{l}_* = (x_1^{(1)} + L - l_1 - l_2) \cdot \mu \cdot A_i$; $\bar{l} = (L - l_0 + x_1^{(1)})$.

Всі інші попередні позначення в рівнянні (2.87) відповідають системі рівнянь (2.85).

Записуючи кожне з останніх двох рівнянь за допомогою двох рівнянь першого порядку, отримуємо, таким чином, десять рівнянь першого порядку. Додаючи до отриманих рівнянь рівняння з системи (2.95), починаючи з сьомого і до останнього які відповідають руху підресореного шасі та мостів, отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 1. \quad m_1 \cdot \dot{q} = -N \sin(\Delta\varphi) + P \cos(\Delta\varphi) - m_1 g \sin(\theta_0 + \varphi_2) + f_{\bar{a}\bar{a}} \cos\psi + f_{\bar{a}\bar{a}\bar{a}} \sin\psi + \\
 \quad + (f_3' - f_3) \sin(\theta_0 + \varphi_2) - N \mu \cos(\Delta\varphi) - \mathcal{D} \cdot (\sin^2 \alpha_i + \mu \cdot \sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i); \\
 2. \quad \dot{x}_1^{(1)} = q; \\
 3. \quad \bar{I}_1 \cdot \dot{p} = -R \cdot \bar{L} - \mathcal{D} \cdot (\sin \alpha_i \cdot \cos \alpha_i - \mu \cdot \sin^2 \alpha_i) \cdot \sin \varphi \cdot l_i; \\
 4. \quad \dot{\varphi}_1 = p; \\
 5. \quad \bar{I}_{z_2} \cdot \dot{\varepsilon} = -\bar{N} \tilde{l} + x_*^{(k)} \bar{N}_2 - y_*^{(k)} \bar{N}_1 - C_k (\varphi_2 - \varphi_3) - N_0 \cos(\theta_0 + \varphi_2) (l_2 - l_1) - N_0 \sin(\theta_0 + \varphi_2) b_1 - q_{\bar{o}\bar{x}} \cdot \\
 \quad \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + (x_1^{(1)} + L - l_1 - l_2) \mathcal{D} (\sin \alpha_i \cos \alpha_i - \mu \sin^2 \alpha_i) \sin \varphi - b_1^{(i)} P (\sin^2 \alpha_i + \mu \sin \alpha_i \cos \alpha_i); \\
 6. \quad \dot{\varphi}_2 = \varepsilon; \\
 7. \quad \tilde{I}_{y_2} \dot{\pi} = -\tilde{R} \tilde{l}_* + N_0 \sin(\theta_0 + \varphi_2) A_i - C_{i \times} [\varphi_2' \cos(\theta_0 + \varphi_2) - \varphi_3' \cos(\theta_0 + \varphi_2) - q_{i \times} [\dot{\varphi}_2' \cos(\theta_0 + \\
 \quad + \varphi_2) - \dot{\varphi}_3'] \cos(\theta_0 + \varphi_2) + N \mu A_i + A_i P (\sin^2 \alpha_i + \mu \sin \alpha_i \cos \alpha_i) - (x_1^{(1)} + L - l_1 - l_2) \times \\
 \quad \times \mathcal{D} (\mu \sin^2 \alpha_i - \sin \alpha_i \cos \alpha_i) \cos \varphi; \\
 8. \quad \dot{\varphi}_2 = \pi; \\
 9. \quad m_3 \cdot \dot{\zeta} = -N_1 - 6C_{A\bar{o}} \cdot x^{(3)} + 2C_{A\bar{o}} \varphi_3' \cdot [(l_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} - 2H) + l_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} - l_{i\bar{a}\bar{o}}] - 6q_{A\bar{o}} \cdot \dot{x}^{(3)} + \\
 \quad + 2q_{A\bar{o}} \cdot \dot{\varphi}_3' \cdot [(l_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} - 2H) + l_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} - l_{i\bar{a}\bar{o}}]; \\
 10. \quad \dot{x}^{(3)} = \zeta; \\
 11. \quad m_3 \cdot \dot{\eta} = -N_2 - \tilde{C}_1 \cdot y^{(3)} + \tilde{C}_3 \cdot \xi_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} + \tilde{C}_4 \cdot \xi_{i\bar{a}\bar{o}} + \tilde{C}_5 \cdot \varphi_3'' - \tilde{Q}_1 \cdot \dot{y}^{(3)} + \tilde{Q}_3 \cdot \dot{\xi}_{i\bar{a}\bar{o}} + \\
 \quad + \tilde{Q}_4 \cdot \dot{\xi}_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} + \tilde{Q}_5 \cdot \varphi_3''; \\
 12. \quad \dot{y}_3 = \eta; \\
 13. \quad [I_{z_3} + m^* \bar{m} (l_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}}^* + \dot{a}_1^*)^2] \dot{\mu} = 0.5 L_{A\bar{A}\bar{C}}^2 [-(2C_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} + C_{i\bar{a}\bar{o}}) \varphi_3 + 2C_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} \psi_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} + C_{i\bar{a}\bar{o}} \psi_{i\bar{a}\bar{o}} - (q_{i\bar{a}\bar{o}} + \\
 \quad + q_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}}) \dot{\varphi}_3 + q_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} \dot{\psi}_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} + q_{i\bar{a}\bar{o}} \dot{\psi}_{i\bar{a}\bar{o}}] + N_1 a + N_2^* (l_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}}^* + a_1^*) - C_{\bar{o}\bar{x}} (\varphi_3 - \varphi_2) - q_{\bar{o}\bar{x}} (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2); \\
 14. \quad \dot{\varphi}_3 = \mu; \\
 15. \quad I_{y_3} \cdot \dot{\xi} = -2C_{A\bar{o}} \cdot [l_{i\bar{a}\bar{o}}^2 + 2 \cdot (l_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} - H)^2] \cdot \varphi_3' - 2q_{A\bar{o}} \cdot [l_{i\bar{a}\bar{o}}^2 + 2 \cdot (l_{\bar{c}\bar{a}\bar{a}} - H)^2] \cdot \dot{\varphi}_3' + \\
 \quad + N_1 \cdot l_{i \times} - C_{i \times} \cdot [\varphi_3' - \varphi_2' \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2)] - q_{i \times} \cdot [\dot{\varphi}_3' - \dot{\varphi}_2' \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2)]; \\
 16. \quad \dot{\varphi}_3' = \xi;
 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
17. (I_{x_3})'' \dot{\lambda} = \{ 4C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} [-\dot{\sigma}^{(3)} - \varphi_3'' (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H) + \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}] + 2q_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} [-\dot{\sigma}^{(3)} - \dot{\varphi}_3'' (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H) + \dot{\xi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}] \} (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H) - \{ 2C_{\xi_{i\ddot{a}\ddot{a}}} [-\dot{\sigma}^{(3)} + \varphi_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{a}} + \xi_{i\ddot{a}\ddot{a}}] + 2q_{i\ddot{a}\ddot{a}} [-\dot{\sigma}^{(3)} + \dot{\varphi}_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{a}} + \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}] \} l_{i\ddot{a}\ddot{a}} - (N_2)'' l_{i\ddot{a}\ddot{a}}, \\
18. \dot{\varphi}_3'' = \lambda; \\
19. m_n \cdot \dot{\eta}_n = 2C_{i\ddot{a}\ddot{a}} (y^{(3)} + \varphi_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{a}} - \xi_{i\ddot{a}\ddot{a}}) + 2q_{i\ddot{a}\ddot{a}} (\dot{y}^{(3)} + \dot{\varphi}_3'' l_{i\ddot{a}\ddot{a}} - \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}) - 2C_\emptyset \cdot \xi_{i\ddot{a}\ddot{a}} - 2q_\emptyset \cdot \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}; \\
20. \dot{\xi}_{i\ddot{a}\ddot{a}} = \eta_n; \\
21. m_c \cdot \dot{\eta}_c = 2C_{cep} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3'' \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - 2H) - \xi_{cep}] - 2C_\emptyset \cdot \xi_{cep} - 2q_\emptyset \cdot \dot{\xi}_{cep}; \\
22. \dot{\xi}_{cep} = \eta_c; \\
23. m_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \dot{\eta}_3 = 2C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \cdot [y^{(3)} - \varphi_3'' \cdot (l_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - H) - \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}] - 2C_\emptyset \cdot \xi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - 2q_\emptyset \cdot \dot{\xi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}; \\
24. \dot{\xi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = \eta_3; \\
25. I_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} \dot{\kappa} = C_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} 0.5L_{AA\zeta}^2 (\varphi_3 - \psi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}) + q_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} 0.5L_{AA\zeta}^2 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}) - C_\emptyset 0.5S_{AA\zeta}^2 \psi_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} - q_\emptyset 0.5S_{AA\zeta}^2 \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}; \\
26. \dot{\psi}_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = \kappa; \\
27. I_{i\ddot{a}\ddot{a}} \dot{\beta} = C_{i\ddot{a}\ddot{a}} 0.5L_{AA\zeta}^2 (\varphi_3 - \psi_{i\ddot{a}\ddot{a}}) + q_{i\ddot{a}\ddot{a}} 0.5L_{AA\zeta}^2 (\dot{\varphi}_3 - \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}) - C_\emptyset 0.5S_{AA\zeta}^2 \psi_{i\ddot{a}\ddot{a}} - q_\emptyset 0.5S_{AA\zeta}^2 \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{a}}; \\
28. \dot{\psi}_{i\ddot{a}\ddot{a}} = \beta; \\
29. \tilde{I}_{C_i} \cdot \dot{\tau} = -R_i l_1 + N \mu \cdot x_1^{(1)} + D \cdot (\sin \alpha_{\bar{i}} \cdot \cos \alpha_{\bar{i}} - \mu \cdot \sin^2 \alpha_{\bar{i}}) \cdot \cos \varphi \cdot l_1; \\
30. \dot{\varphi}_1' = \tau.
\end{array} \right. \quad (2.98)$$

$$\bar{I}_1 = I_{C_1} + \frac{m_1 \cdot \bar{L} \cdot x_1^{(1)}}{\cos(\Delta\varphi) - \mu \cdot \sin(\Delta\varphi)};$$

$$R = [-P \cdot \sin(\Delta\varphi) + m_1 \cdot g \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) - f_{\text{e}\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \sin \psi + f_{\text{d}\ddot{a}\ddot{a}} \cdot \cos \psi - (f_3' - f_3) \times \\ \times \cos(\theta_0 + \varphi_2) + m_1 \cdot (\ddot{x}_1^{(1)} \cdot \Delta\varphi + 2 \cdot \dot{x}_1^{(1)} \cdot \Delta\dot{\varphi} - x_1^{(1)} \cdot \ddot{\varphi}_2)] / [\cos(\Delta\varphi) - \mu \cdot \sin(\Delta\varphi)];$$

$$\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2); \quad \Delta\dot{\varphi} = (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2); \quad \bar{L} = x_1^{(1)} \cdot \cos(\Delta\varphi) + y_1^{(1)} \cdot \sin(\Delta\varphi) + \mu \cdot r_{\text{mid}}.$$

$$\tilde{l} = (l - l_2) \cdot \cos(\Delta\varphi) + (b_1 - r_{\text{mid}}) \cdot [\mu \cdot \cos(\Delta\varphi) - \sin(\Delta\varphi)];$$

$$\tilde{l}_* = L - l_1 + x_1^{(1)} - l_2 + \mu \cdot A_i; \quad \bar{l} = L - l_0 + x_1^{(1)};$$

$$\tilde{R}_i = 2\dot{\varphi}_2' \cdot \dot{x}_1^{(1)} \cdot m_1; \quad \tilde{I}_{Y_2} = I_{Y_2} + m_1 \cdot \bar{l} \cdot \tilde{l}_*;$$

$$N = \{ -P \sin(\Delta\varphi) + m_1 g \cos(\theta_0 + \varphi_2) - f_{\text{sid}} \sin\psi + f_{\text{dom}} \cos\psi - (f'_3 - f_3) \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_2) + m_1 \ddot{y}_1^{(1)} \} / \{ \cos(\Delta\varphi) - \mu \sin(\Delta\varphi) \}$$

$$\bar{N} = [-P \sin(\Delta\varphi) + m_1 g \cos(\theta_0 + \varphi_2) - f_{\text{sid}} \sin\psi - (f'_3 - f_3) \cos(\theta_0 + \varphi_2) + m_1 (\ddot{x}_1^{(1)} \times \Delta\varphi + 2\dot{x}_1^{(1)} \Delta\dot{\varphi} + x_1^{(1)} \ddot{\varphi}_1)] / [\cos(\Delta\varphi) - \mu \sin(\Delta\varphi)];$$

$$N_1 = m_1^* \{ -N [\mu \cos(\theta_0 + \varphi) + \sin(\theta_0 + \varphi)] - m_2 D \ddot{\varphi}_2 - P (\sin^2 \alpha_{\Pi} + \mu \sin \alpha_{\Pi} \cos \alpha_{\Pi}) \times \cos \theta_0 + m_2 C \dot{\varphi}^2 - \frac{m_2}{m_3} [6C_{\text{БШ}} x^{(3)} - 2C_{\text{БШ}} \varphi'_3 (2l_{\text{3a}\delta} - 2H - l_{\text{nep}}) + 6q_{\text{БШ}} \times \dot{x}^{(3)} - 2q_{\text{БШ}} \dot{\varphi}'_3 (2l_{\text{3a}\delta} - 2H - l_{\text{nep}})] \};$$

$$N_2 = -m_1^* \{ N_0 + N [\mu \sin(\theta_0 + \varphi) + \cos(\theta_0 + \varphi)] + m_2 [\tilde{A}_3 + (l_{\text{3a}\delta} + a_1) \ddot{\varphi}_3 + \ddot{\varphi}'' \times l_{\text{нч}}] - P (\sin^2 \alpha_{\Pi} + \mu \sin \alpha_{\Pi} \cos \alpha_{\Pi}) \sin \theta_0 + m_2 C \ddot{\varphi} + m_2 D \dot{\varphi}^2 \};$$

$$\bar{N}_1 = m_1^* \cdot \{ -\bar{N} \cdot [\mu \cdot \cos(\theta_0 + \varphi_1) + \sin(\theta_0 + \varphi_1)] - P \cdot (\sin^2 \alpha_{\Pi} + \mu \cdot \sin \alpha_{\Pi} \cdot \cos \alpha_{\Pi}) \times \cos \theta_0 + m_2 \cdot C \cdot \dot{\varphi}_2^2 - \frac{m_2}{m_3} \cdot [6C_{\Gamma} \cdot x^{(3)} - 2C_{\text{БШ}} \cdot \varphi'_3 \cdot (2l_{\text{3a}\delta} - 2H - l_{\text{nep}}) + 6q_{\text{БШ}} \cdot \dot{x}^{(3)} - 2q_{\text{БШ}} \cdot \dot{\varphi}'_3 \cdot (2l_{\text{3a}\delta} - 2H - l_{\text{nep}})] \};$$

$$\bar{N}_2 = -m_1^* \{ N_0 + \bar{N} [\cos(\theta_0 + \varphi_1) + \mu \sin(\theta_0 + \varphi_1)] - P (\sin^2 \alpha_{\Pi} + \mu \sin \alpha_{\Pi} \cos \alpha_{\Pi}) \times \sin \theta_0 + m_2 [\tilde{A}_3 + (l_{\text{3a}\delta} + a_1) \ddot{\varphi}_3 + \ddot{\varphi}'' l_{\text{нч}}] + m_2 D \dot{\varphi}_2^2 \};$$

$$\bar{I}_{Z_2} = I_{C_2} + \{ m_1 \tilde{l} [(KC_1) \cos\psi - x_1^{(1)}] \} / \{ \cos(\Delta\varphi) - \mu \sin(\Delta\varphi) \} + m_1^* m_2 (Cx_*^{(k)} - Dy_*^{(k)}) + m_1^* m_1 (KC_1) \cos\psi [\sin(\theta_0 + \varphi_1) (\mu x_*^{(k)} - y_*^{(k)}) + \cos(\theta_0 + \varphi_1) (x_*^{(k)} - \mu y_*^{(k)})];$$

$$\tilde{A}_3 = \frac{1}{m_3} \cdot (\tilde{C}_1 \cdot y^{(3)} - \tilde{C}_3 \cdot \xi_{\text{3a}\delta} - \tilde{C}_4 \cdot \xi_{\text{nep}} - \tilde{C}_5 \cdot \varphi'' + Q_1 \cdot \dot{y}^{(3)} - Q_3 \cdot \dot{\xi}_{\text{nep}} - \tilde{Q}_4 \cdot \dot{\xi}_{\text{3a}\delta} - \tilde{Q}_5 \cdot \dot{\varphi}_3'');$$

$$\tilde{C}_1 = 4C_{\text{3a}\delta} + 2C_{\text{nep}}; \quad \tilde{C}_3 = 4C_{\text{3a}\delta}; \quad \tilde{C}_4 = 2C_{\text{nep}}; \quad \tilde{C}_5 = 2C_{\text{nep}} \cdot l_{\text{nep}} - 4C_{\text{3a}\delta} \cdot (l_{\text{3a}\delta} - H);$$

$$\tilde{Q}_1 = 2q_{зад} + 2q_{неп}; \quad \tilde{Q}_3 = 2q_{неп}; \quad \tilde{Q}_4 = 4q_{зад}; \quad \tilde{Q}_5 = 2q_{неп} \cdot l_{неп} - 2q_{зад} \cdot (l_{зад} - H);$$

I_{z_2}, I_{y_2} – моменти інерції ХЧ напрямної, без врахування маси снаряда, що сходять відносно осей z_2 та y_2 відповідно; $I_{z_3}, I_{y_3}, I_{x_3}$ – моменти інерції підресореної частини ПУ (шасі); $I_{зад}, I_{неп}$ – моменти інерції заднього та переднього мостів.

$$x_*^{(k)} = -l_2 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + b \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) + l_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi);$$

$$y_*^{(k)} = -l_2 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi) - b \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) + l_0 \cdot \sin(\theta_0 + \varphi);$$

$$\left. \begin{aligned} f_3 &= m_1 \cdot \ddot{y}^{(3)}; & f'_3 &= m_1 \cdot [\ddot{\varphi}_3(l_{зад} + a_1) - \ddot{\varphi}_3'' \cdot l_{нч}]; \\ f_{від} &= m_1 \cdot (KC_1) \cdot \dot{\varphi}_2^2; & f_{дом} &= m_1 \cdot (KC_1) \cdot \ddot{\varphi}_2; \end{aligned} \right\}$$

2.2.4 Геометрія мас напрямних ПУ, що використовується в розрахункових моделях

Реалізація отриманих в роботі математичних моделей шляхом чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь потребує визначення інерційних характеристик складових частин системи на кожному кроці інтегрування. До цих характеристик відносяться маси та моменти інерції снаряда, напрямної та шасі. Маса та моменти інерції шасі залишаються постійними і їх можливо визначити наперед. Маса снаряда та його моменти інерції в межах руху по ПУ теж можливо вважати постійними і також визначити заздалегідь. Інерційні ж характеристики напрямної будуть суттєво змінними. Справа в тому, що початкова геометрія мас пакету напрямних, яка визначається початковою кількістю та початковим розміщенням снарядів в пакеті напрямних, змінюється

по мірі сходу окремих снарядів. Нижче наводиться послідовність обчислень зазначених інерційних характеристик.

Введемо систему координат $\{a, b, l\}$, що незмінно пов'язана з пакетом напрямних (рис. 2.18) та наступні позначення:

C_1 – центр мас снаряда з працюючим двигуном;

C_2 – центр мас пакету напрямних зі снарядами, крім снаряда з працюючим двигуном;

m_1 – маса одного снаряда; m_2 – маса пакету напрямних;

a_i, b_i, l_i – координати центра мас C_{1i} i -го снаряда;

a_2, b_2, l_2 – координати центра мас C_2 пакету напрямних;

a_0, b_0, l_0 – координати центра мас пакету напрямних без снарядів;

1. Координати центра мас напрямної після розміщення на ній снарядів (в довільному порядку та кількості):

$$a_{20} = \frac{a_0 m_{20} + \sum m_{1i} \cdot a_i}{m_{20} + \sum m_{1i}}; \quad b_{20} = \frac{b_0 m_{20} + \sum m_{1i} \cdot b_i}{m_{20} + \sum m_{1i}}; \quad l_{20} = \frac{l_0 m_{20} + \sum m_{1i} \cdot l_i}{m_{20} + \sum m_{1i}},$$

де m_{20} – маса напрямної без снарядів; m_{1i} – маса i -го снаряда, якщо він відсутній, то $m_{1i} = 0$.

При цьому: $a_i = \frac{d}{2} + d(j-1)$; $b_i = \frac{d}{2} + d(k-1)$; $j = 1, \dots, 10$; $k = 1, \dots, 4$ –

індекси, що визначають геометричне положення напрямної для i -го снаряда в пакеті напрямних:

j – порядковий індекс розташування по горизонту в ряді (зліва);

k – порядковий індекс розташування по вертикалі в рядів (знизу);

l_i – задана величина, що заздалегідь визначається для всіх снарядів;

d – калібр напрямної труби.

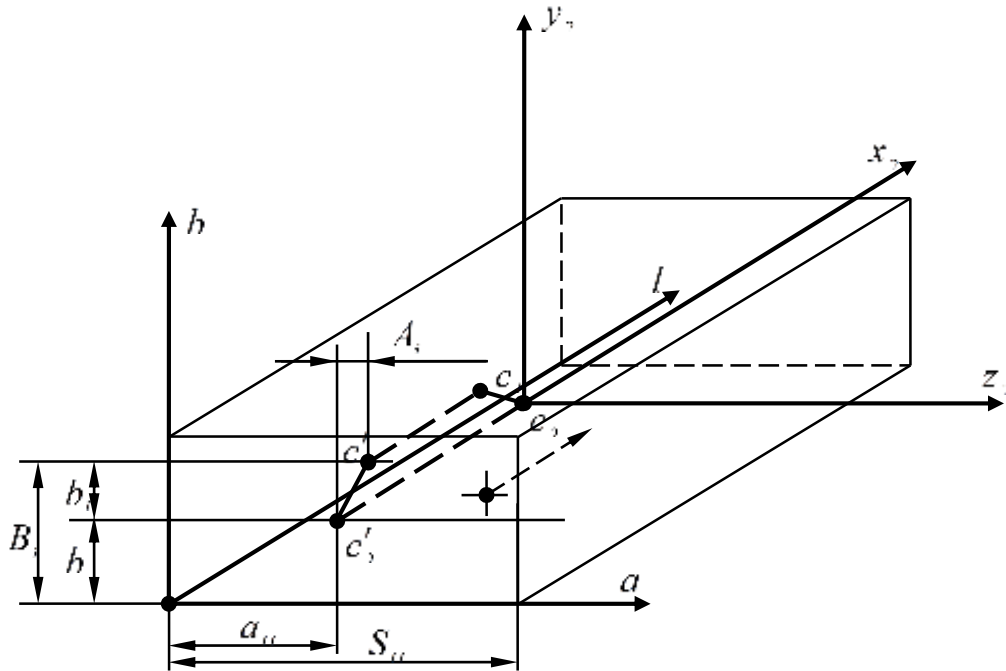


Рисунок 2.18 - До визначення інерційних характеристик пакету напрямних

2. Маса напрямної після розміщення на ній снарядів:

$$M_{20} = m_{20} + n \cdot m_1, \quad \text{де } n - \text{кількість снарядів.}$$

3. Моменти інерції напрямної після розміщення на ній снарядів:

$$I_{z_{20}} = I_z + \sum m_{li} \cdot [(b_i - b_{20})^2 + (l_i - l_{20})^2];$$

$$I_{y_{20}} = I_y + \sum m_{li} \cdot [(a_i - a_{20})^2 + (l_i - l_{20})^2],$$

де I_z, I_y – моменти інерції пакету напрямних без РС відносно осей, що проходять через її центр мас, координати якого $\{a_0, b_0, l_0\}$ визначені попередньо. Ці величини задаються як попередньо визначені.

4. Координати центра мас напрямної після включення двигуна i -го снаряда без врахування маси цього снаряда:

$$a_2 = \frac{a_{20} \cdot M_{20} - a_i \cdot m_{li}}{M_{20} - m_{li}}; \quad b_2 = \frac{b_{20} \cdot M_{20} - b_i \cdot m_{li}}{M_{20} - m_{li}}; \quad l_{20} = \frac{l_{20} \cdot M_{20} - l_i \cdot m_{li}}{M_{20} - m_{li}},$$

5. Лінійні розміри, що використовуються на першій ділянці руху (відносний спокій снаряда на напрямній):

$$b = b_2; \quad b_1^{(i)} = b_i - b_2; \quad l_1 = l_{ii}; \quad l_2 = l_2; \quad A_i = a_i - a_2; \quad B_i = b + b_1^{(i)} = b_i$$

6. Маса напрямної після спрацьовування двигуна i -го снаряда без маси цього снаряда:

$$M_2 = M_{20} - m_{ii}.$$

7. Момент інерції напрямної після спрацьовування двигуна i -го снаряда без маси цього снаряда відносно осей проходять через центр мас напрямної:

$$I_{z_2} = I_{z_{20}} - m_{ii} \cdot [(b_i - b_2)^2 + (l_i - l_2)^2] - I_1;$$

$$I_{y_2} = I_{y_{20}} - m_{ii} \cdot [(a_i - a_2)^2 + (l_i - l_2)^2] - I_1.$$

де I_1 – екваторіальний момент інерції снаряда.

8. Лінійні розміри, що використовуються на ділянках відносного руху снаряда по напрямній:

$$b = b_2; \quad b_1^{(i)} = b_i - b; \quad l_1 = l_{ii}; \quad l_2 = l_2; \quad A_i = a_i - a_2; \quad B_i = b + b_1^{(i)}.$$

2.3 Результати чисельного моделювання

На основі диференційних рівнянь руху окремих частин системи РС-ПУ на ділянці відносного спокою снаряда на напрямній (2.75), на ділянці його поступального руху по напрямній (2.85) та на ділянці відносного складного руху снаряда по напрямній (2.98), були розроблені єдиний алгоритм та обчислювальна програма чисельного моделювання сумісного руху реактивного снаряда та мобільної пускової установки РСЗВ. Алгоритм передбачає чисельне інтегрування систем диференційних рівнянь кожної ділянки руху РС по ПУ методом Рунге-Кутта с послідуною передачею результатів розрахунку у якості початкових умов для слідкуючої ділянки, а також розрахунок коливань ПУ після сходу снаряда в межах проміжку часу між моментом втрати контакту РС з ПУ та моментом запуску двигуна чергового снаряда з послідуною передачею результатів розрахунку величин параметрів, що визначають рух ПУ як початкових умов чергового циклу розрахунків. В зв'язку з тим, що метою роботи передбачається дослідження руху системи РС-ПУ у відхіленнях з положення статичної рівноваги, яке визначається початковим завантаженням направляючої снарядами та кутом прицілювання, розрахунок починається з нульових початкових умов і всі отримані результати стосуються динамічних складових параметрів коливань ПУ і руху снарядів в межах ПУ.

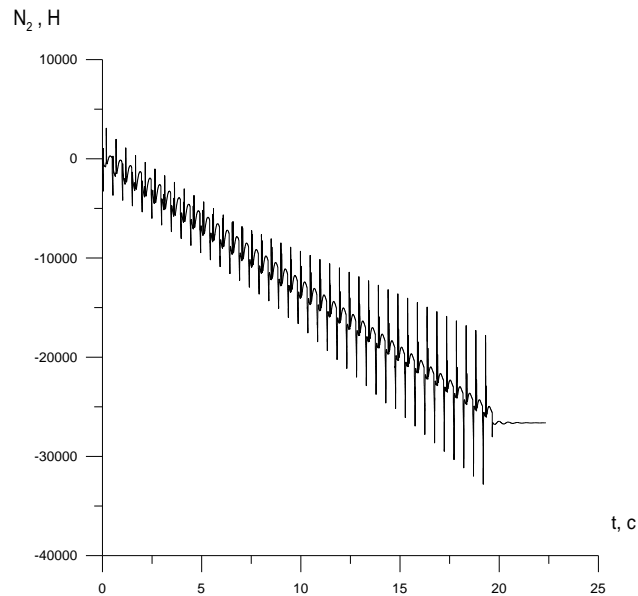


Рисунок 2.19 - Залежність від часу розрахункового значення динамічної складової реакції N_2 при сході з напрямлюючої 40 снарядів і часі затримки між пострілами $\tau = 0.3$ с.

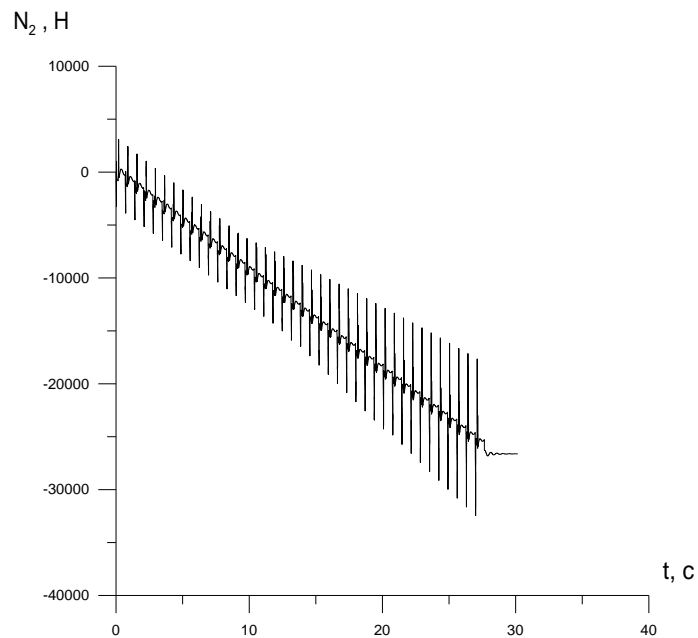


Рисунок 2.20 - Залежність від часу розрахункового значення динамічної складової реакції N_2 при сході з напрямлюючої 40 снарядів і часі затримки між пострілами $\tau = 0.5$ с.

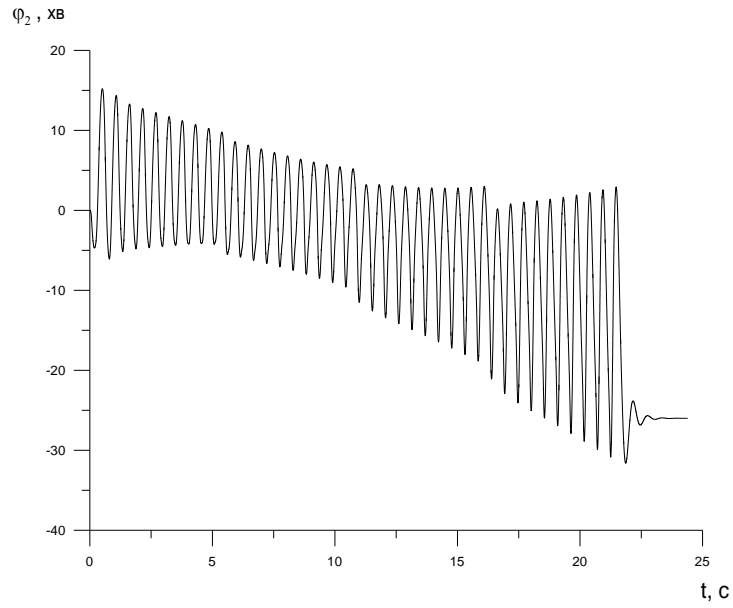


Рисунок 2.21 - Залежність від часу розрахункового значення кута нахилу направляючої при сході 40 снарядів і затримці між пострілами $\tau = 0.3$ с.

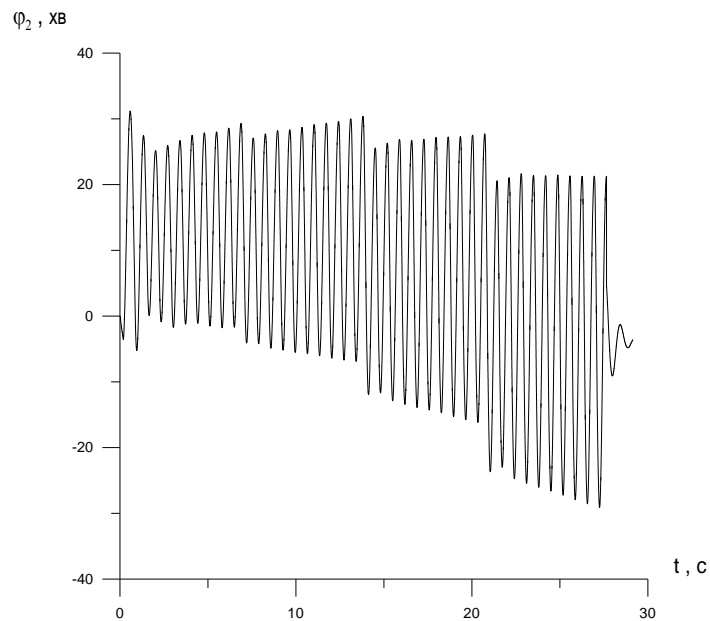


Рисунок 2.22 - Залежність від часу розрахункового значення кута нахилу направляючої при сході 40 снарядів і затримці між пострілами $\tau = 0.5$ с.

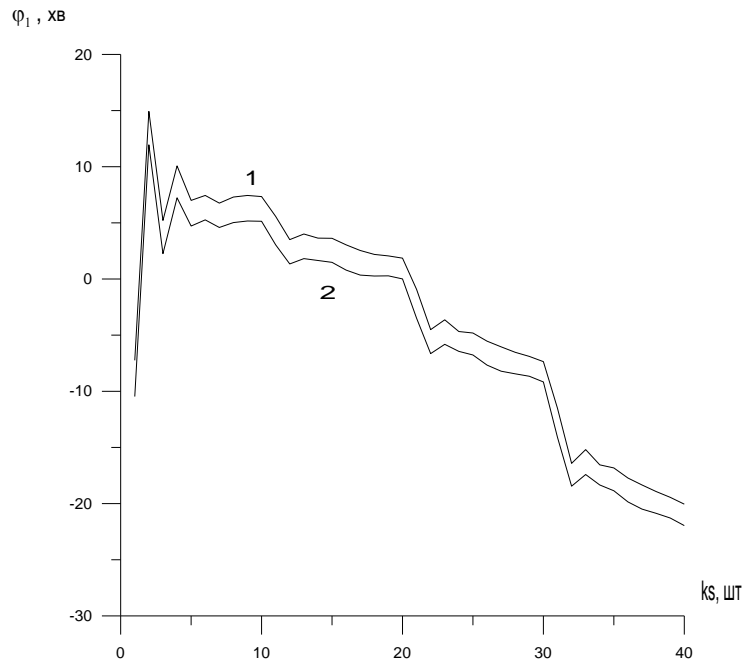


Рисунок 2.23 - Залежність кута вильоту снаряда від кількості здійснених пострілів при сході 40 снарядів з направляючої, затримці між пострілами $\tau = 0.3$ с. і силі зтяжки стопорного пристрою $Q=500$ кГ (1) і 1000 кГ (2)

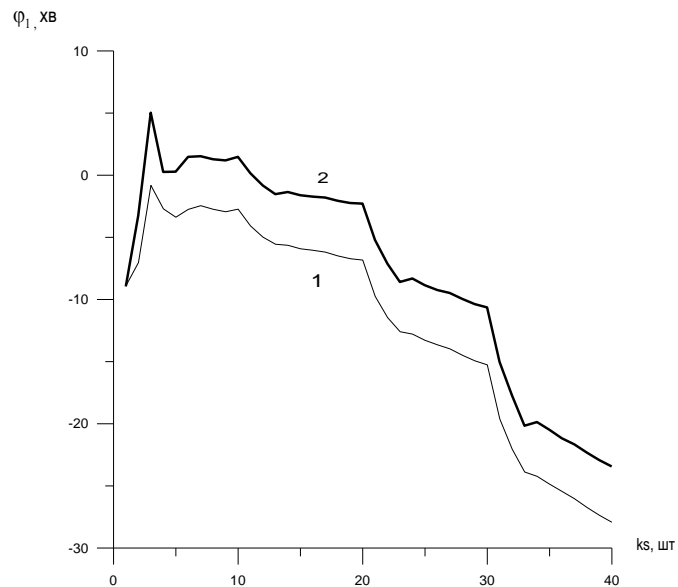


Рисунок 2.24 - Залежність кута вильоту снаряда від кількості здійснених пострілів загальною кількістю 40 і часі затримки між пострілами $\tau = 0.5$ с. при стрільбі з сухого (1) та вологого (2) ґрунту

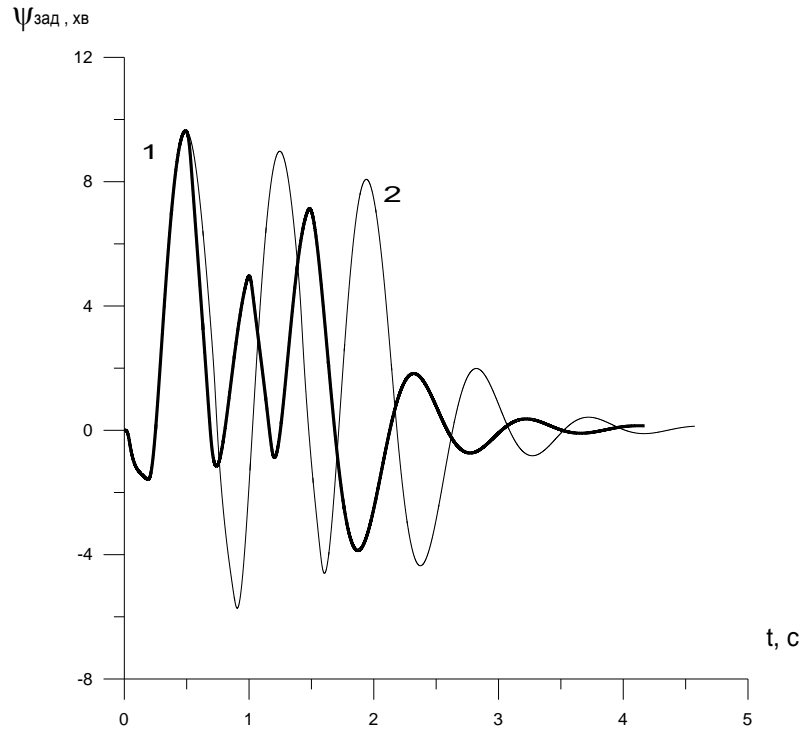


Рисунок 2.25 - Кутові коливання заднього мосту колісного носія: 1- час між пусками снарядів $\tau = 0.3$ с.; 2- час між пусками снарядів $\tau = 0.5$ с.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання 1-го етапу НДР було проведено моделювання динаміки старту реактивного снаряду з пускової установки реактивної системи залпового вогню з розробкою розрахункової та математичної моделей взаємодії пускової установки із ґрунтом під час залпового пуску реактивних снарядів. Під час дослідження було виконано наступне:

1. Створено розрахункову модель гіпотетичної пускової установки реактивної системи залпового вогню. Виявлено, що система яка досліджується є складною та має окремі складові частини: літальний апарат, напрямні, носій та колісні мости. Розроблену розрахункову модель передбачається використати при моделюванні процесів газодинамічного старту з урахуванням взаємодії пускової установки з ґрунтом під час навантаження в процесі залпового старту.

2. Побудовано математичну модель сумісного руху реактивних снарядів і частин пускової установки реактивної системи залпового вогню під час стартового навантаження, яка враховує взаємодію між реактивними снарядами, пусковою установкою і ґрунтовою основою, а також жорсткостні та масові характеристики елементів конструкції пускової установки під час залпу реактивних снарядів. Розроблено системи диференціальних рівнянь, які описують механічні процеси, що відбуваються при старті реактивних снарядів. Виявлено, що старт реактивного снаряду необхідно розподілити на три ділянки: ділянку поступального руху РС, ділянку складного руху пакету трубчастих напрямних і РС, та коливань пакету напрямних після виходу РС з нього. Поведінка системи пакет напрямних – реактивні снаряди досліджується з урахуванням взаємодії з ґрунтовою основою під час залпового навантаження.

3. У результаті дослідження отримана модель динаміки старту реактивної системи залпового вогню з трубчастими направляючими під час залпового пуску реактивних снарядів. Особливістю розробленої математичної моделі руху РС по напрямних ПУ з колісним носієм є те, що диференціальні рівняння розглянуті з одночасним урахуванням податливості ПУ та впливу СЗП. Це

надає можливість оцінити по окремоті вагу всіх головних параметрів ПУ, а також створити імітаційну модель ПУ для оцінки загальної картини початкових збурень сходу снарядів. Можливості чисельного інтегрування при сучасному рівні розвитку обчислювальної техніки дозволяють відмовитися від знаходження аналітичних рішень, що, як правило, носять спрощений характер, і одержати параметри сходу снарядів з ПУ з необхідним ступенем точності.

Математичне моделювання динаміки сходу РС з напрямної ПУ дозволяє значно зменшити обсяг відповідних натурних випробувань, вирішити такі проектні задачі, як аналіз функціонування елементів, дослідження параметричної стабільності характеристик сходу РС, а також оцінити вплив окремих факторів, що збурюють, при відтворенні різних умов експлуатації.

Результати роботи можна використовувати у конструкторських бюро та підприємствах відповідного профілю. Створена модель дозволить підвищити якісно-експлуатаційні характеристики, скоротити час та зменшити вартість розробки новітніх зразків пускових установок реактивних систем залпового вогню, які будуть конкурентоспроможні як на вітчизняному, так і на міжнародному ринках.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Светлицкий В. А. Динамика старта летательных аппаратов / В. А. Светлицкий. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1986. – 280 с.
2. Лойцянский Л. Г. Курс теоретической механики / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье – М.: Наука. – 1982. – 420 с.
3. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман.– М.: Высшая школа. – 1980. – 408 с.
4. Ротенберг Р. В. Подвеска автомобиля: колебания и плавность хода / Р. В. Ротенберг. – М.: Машиностроение. – 1972. – 392 с.
5. Смирнов Г. А. Теория движения колесных машин / Г. А. Смирнов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 272с.
6. Гантмахер Ф. Р. Теория полета неуправляемых ракет / Ф. Р. Гантмахер, Л. М. Левин. – М.: Наука. Гос. изд. физ.-мат. лит. – 1959. – 360 с.
7. Шийко О. М. Математична модель руху реактивного снаряда та пускової установки після спрацьовування стопорно-замкового пристрою напрямної / О. М. Шийко, В. О. Телухін // Системи обробки інформації.–Х.:ХВУ.– 2004. –Вип. 3. – С.220-226.
8. Шийко А. Н. Математическая модель движения неуправляемого реактивного снаряда по направляющим пусковой установки / А. Н. Шийко, Р. Ю. Михайлик, В. А. Телухин // Артиллерийское и стрелковое вооружение.– №1(10).– 2004.– С. 31-33.
9. Шийко О. М. Моделювання сумісного руху реактивного снаряда та мобільної пускової установки РСЗВ / О. М. Шийко // Системи озброєння і військова техніка. – Харків: ХУПС. – 2014.– № 2 (38). – С. 44 – 60.