

УДК 629.3.018.7:621.3.088.3

ОЦІНЮВАННЯ ПРИДАТНОСТІ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ МОБІЛЬНИХ МАШИН

С. Лебедєв, канд. техн. наук,

А. Коробко, канд. техн., наук, доц.,

Харківська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Запропоновано методу вибору кількості і місця установлення акселерометрів, а також кваліметричні критерії оцінювання точності вимірювань при динамічних випробуваннях мобільних машин

Ключові слова: *мобільна машина, оцінювання придатності методів випробувань.*

Вступ. З кожним роком у світі збільшується виробництво автомобілів, тракторів та інших мобільних машин, підвищується їх технічний рівень. Це супроводжується посиленням вимог до безпеки руху і якості виробів мобільної техніки. Для забезпечення цих вимог необхідні досконалі методи контролю кінематичних і динамічних параметрів в процесі сертифікаційних випробувань і подальшої експлуатації.

Вже набули розвитку методи оцінювання динаміки мобільних машин на основі використання давачів інерції (акселерометрів). Проте для отримання повної і достовірної інформації необхідне обґрунтування мінімально-достатньої кількості вимірювальних осей акселерометрів і раціональних точок їх встановлення.

Аналіз останніх досліджень і досягнень. Дослідження використання акселерометрів під час проведення динамічних випробувань набуло поширення в останні роки [1, 2, 3]. Також застосування акселерометрів під час випробувань автомобілів у даний час узаконено міжнародними [4] і національними стандартами низки країн [5, 6]. На сьогодні актуальним є питання створення мобільних реєстраційно-вимірювальних комплексів на основі лінійних низькочастотних акселерометрів, призначених для оцінювання параметрів руху мобільних машин під час проведення кваліметричних випробувань.

При прямолінійному поступальному русі однієї вимірювальної осі достатньо для отримання достовірної інформації про динаміку автомобіля. При плоскопаралельному русі використання однієї вимірювальної осі недостатньо. В роботі [1] для плоскопаралельного руху мобільних машин запропоновано використовувати два трикомпонентні акселерометри (кожний з яких має три взаємно перпендикулярні вимірювальні осі). Проте у відомій літературі [1] відсутні рекомендації щодо раціонального вибору числа і місця

установлення акселерометрів залежно від задач, що ставляться перед випробувачами під час проведення динамічних випробувань.

Якщо кількість вимірювальних осей менша мінімально необхідної, то результати випробувань малоінформативні, а об'єкт, що випробовується, володіє недостатньою спостережністю. Якщо ж кількість вимірювальних осей більша мінімально необхідної, то деякі вимірювальні осі дублюють одна одну. В цьому випадку можна підвищити точність вимірювання, використовуючи метод паралельних спостережень [7].

Мета дослідження – підвищити точність визначення параметрів руху мобільних машин під час проведення динамічних випробуваннях. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

– визначити взаємозв'язок між кількістю ступенів рухливості об'єкта і мінімально-необхідною кількістю вимірювальних осей;

– визначити раціональну кількість лінійних низькочастотних акселерометрів і місць їх встановлення при різних фізичних моделях представлення мобільних машин в процесі випробувань.

Визначення мінімально-необхідної кількості вимірювальних осей. Мінімально необхідна кількість вимірювальних осей може визначатись числом ступенів рухливості об'єкта (число ступенів свободи щодо нерухомої ланки – стояка [8]).

Матеріальна точка має в тривимірному просторі три степені свободи.

Для вимірювання параметрів її руху достатньо в точку A помістити один трикомпонентний акселерометр (з трьома взаємно перпендикулярними осями чутливості).

Матеріальне тіло в тривимірному просторі має шість степенів свободи (рис. 1). В цьому випадку необхідно два трикомпонентних акселерометри ($K_D = H/n$, де H – кількість степенів свободи відносно нерухомої ланки [8]; n – кількість осей чутливості в одному давачі).

Для визначення параметрів руху тіла в трьох площинах розглянемо проекції матеріального тіла на площини XOY , XOZ , ZOY (рис. 2).

Кутові швидкості обертання тіла щодо осей OX , OY , OZ можуть бути визначені залежно від величини лінійних прискорень таким чином (рис. 2):

$$\dot{\omega}_{XOY} = \dot{\omega}_Z = \frac{\ddot{Y}_A - \ddot{Y}_B}{|X_A - X_B|} = \frac{\ddot{X}_A - \ddot{X}_B}{|Y_A - Y_B|}; \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_{XOZ} = \dot{\omega}_Y = \frac{\ddot{Z}_A - \ddot{Z}_B}{|X_A - X_B|} = \frac{\ddot{X}_A - \ddot{X}_B}{|Z_A - Z_B|}; \quad (2)$$

$$\dot{\omega}_{ZOY} = \dot{\omega}_X = \frac{\ddot{Y}_A - \ddot{Y}_B}{|Z_A - Z_B|} = \frac{\ddot{Z}_A - \ddot{Z}_B}{|Y_A - Y_B|}. \quad (3)$$

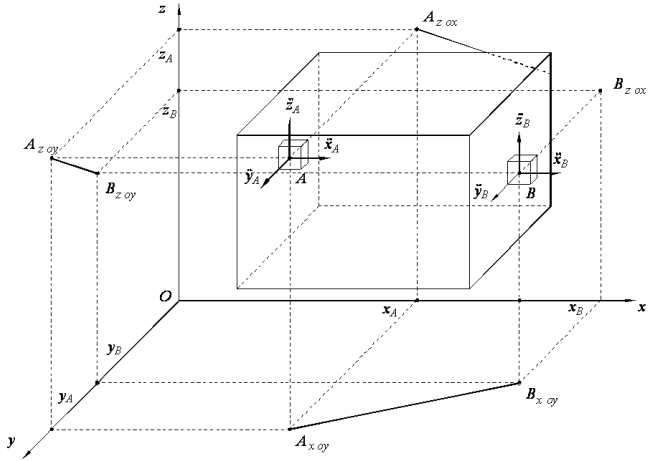


Рисунок 1 - Рух матеріального тіла в тривимірному просторі:
точки A і B – місця установлення акселерометрів

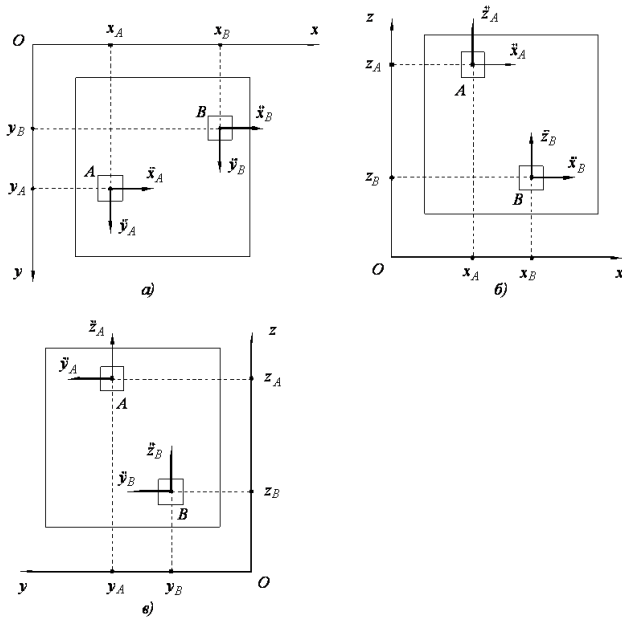


Рисунок 2 - Рух матеріального тіла в площинах тривимірному простору:
 a – в площині XOY ; $б$ – в площині XOZ ; $в$ – в площині ZOY

Знаючи параметри $\ddot{X}_A; \ddot{Y}_A; \ddot{Z}_A; \ddot{X}_B; \ddot{Y}_B; \ddot{Z}_B; \dot{\omega}_X; \dot{\omega}_Y; \dot{\omega}_Z$, можна визначити параметри руху будь-якої точки матеріального тіла. Для цього в кожній з площин необхідно скласти рівняння пласкопаралельного руху.

Очевидно, що під час руху матеріального тіла в двомірному просторі воно матиме три степені свободи. В цьому випадку для вимірювання параметрів руху достатньо трьох однокомпонентних акселерометрів, або одного двокомпонентного і одного однокомпонентного акселерометрів.

Кутове прискорення обертання тіла в площині XOY

$$\dot{\omega}_{XOY} = \dot{\omega}_Z = \frac{\ddot{Y}_A - \ddot{Y}_C}{|X_A - X_C|}; \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_{XOY} = \dot{\omega}_Z = \frac{\ddot{Y}_A - \ddot{Y}_B}{|X_A - X_B|}; \quad (5)$$

Знаючи параметри $\ddot{Y}_A; \ddot{Y}_C; \ddot{X}_B; \dot{\omega}_Z$ і параметри $\ddot{Y}_B; \ddot{Y}_C; \ddot{X}_A; \dot{\omega}_Z$, можна скласти рівняння пласкопаралельного руху і визначити кінематичні параметри будь-якої точки матеріального тіла.

Визначення раціональної кількості лінійних акселерометрів і місць їх установлення під час випробувань мобільних машин. Визначення числа степенів рухливості просторового механізму, яким є мобільні машини, здійснюється за допомогою структурної формули Сомова-Малишева [8] ($H = 6n_1 - 5p_V - 4p_{IV} - 3p_{III} - 2p_{II} - p_I$, де n_1 – число рухомих ланок механізму щодо нерухомої ланки – стояка; $p_V, p_{IV}, p_{III}, p_{II}, p_I$ – число кінематичних пар I-го, II-го, III-го, IV-го, і V-го класів (клас кінематичної пари визначається числом зв'язків або обмежень, що накладаються на відносне переміщення ланок пари [8]).

Розглянемо поставлену задачу на прикладі автомобіля. На рис. 3 наведена кінематична схема автомобіля, представленого як просторовий механізм. Для проведення аналізу механізму приймемо такі допущення:

- пружна підвіска автомобіля відсутня;
- колеса автомобіля абсолютно жорсткі як в радіальному, так і в бічному напрямі;
- у плямах контакту коліс з дорогою відсутнє ковзання – як бічне, так і поздовжнє.

Прийняття цих допущень дозволяє вважати усі зв'язки, що накладаються на ланки автомобіля, утримуючими (зв'язок задається рівністю $f(x, \dot{x}) = 0$, де аргументами функції є час, швидкість і прискорення відповідно [8]) і голономними (накладають обмеження лише на положення (переміщення) точок і тіл системи [8]), а автомобіль – голономною механічною системою (системою, в якій діють лише голономні зв'язки [8]).

За наявності у просторових механізмів великої кількості кінематичних пар утруднено визначення числа степенів рухливості. Труднощі викликає

визначення пасивних зв'язків і їх відкидання [8]. Тому визначення сумарного числа активних зв'язків K , що накладаються на ланки автомобіля, визначаємо через число степенів рухливості [8]:

$$K = 6n_1 - H. \quad (6)$$

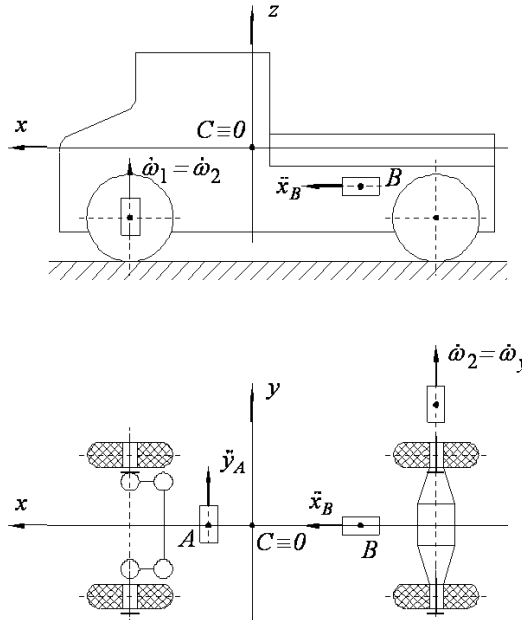


Рисунок 3 - Кінематична схема автомобіля, представлена в двох площинах за відсутності ковзання у плямах контакту коліс з дорогою, і схема установки датчиків

Очевидно, що при прийнятих допущеннях автомобіль має дві степені рухливості, що визначаються числом незалежних рухів, створюваних двома вхідними ланками. Цими ланками є ведучі і керуючі колеса автомобіля. Рухом ведучого колеса є обертання навколо своєї осі, рухом керуючого колеса – обертання навколо осі шворня (рис. 3). Таким чином, щоб визначити всі параметри руху автомобіля в площині дороги $ХОУ$, достатньо встановити два однокомпонентних акселерометри для вимірювання кутових прискорень (як показано на рис. 3). Рух двох задніх коліс взаємозв'язаний між собою. При прийнятих допущеннях рух двох передніх коліс також взаємозв'язаний. Оскільки відведення і ковзання коліс відсутні, то два однокомпонентних акселерометри для вимірювання кутового прискорення, встановлених на колесах, можна замінити двома лінійними

низькочастотними акселерометрами, встановленими в кузові автомобіля (рис. 3).

Відповідно до співвідношення (6), на ланки автомобіля накладено 46 зв'язків (при $n_1=8$ – див. рис. 3).

При появі ковзання у плямах контакту коліс з дорогою додаються ще три ступені рухливості в тяговому режимі і п'ять ступенів рухливості – в гальмівному режимі. Для цього випадку схема установлення лінійних низькочастотних акселерометрів наведена на рис. 4.

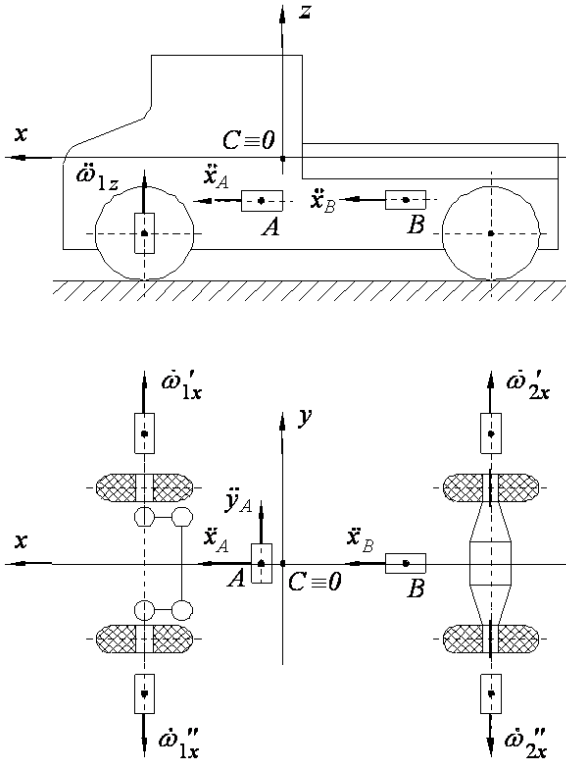


Рисунок 4 - Кінематична схема автомобіля, представлена в двох площинах при ковзанні коліс у плямах контакту, і схема установки датчиків

У тяговому режимі ковзання у плямах контакту ведених керуючих коліс відсутнє. В гальмівному режимі додаються дві степені рухливості керуючих гальмівних коліс. У зв'язку з цим для гальмівного режиму руху автомобіля на

схемі додано два давачі кутових прискорень передніх коліс, що визначають $\dot{\omega}'_{1X}; \ddot{\omega}'_{1X}$.

Якщо враховувати податливість підвіски і шин, то число ступенів рухливості автомобіля збільшується і, отже, збільшується необхідне число вимірювальних осей акселерометрів.

Співвідношення між дійсним числом вимірювальних осей акселерометрів і числом ступенів рухливості механічної системи (в нашому випадку автомобіля) характеризує спостережність місця і можливість повного управління ним. Визначення кінематичних параметрів по всіх координатах, що характеризують можливі переміщення, роблять об'єкт повністю спостережуваним. При використанні акселерометрів як давачів для системи управління рухом мобільної машини це дозволяє зробити об'єкт повністю керованим.

Об'єкт називається повністю керованим, якщо існує така управляюча дія $U \in \mathcal{C}$, визначена на кінцевому інтервалі часу, яка переводить його з будь-якого початкового стану $\bar{X}(t_0)$ в будь-який заданий кінцевий стан. Очевидно, щоб здійснити таке перетворення, управляюча дія повинна прямо або побічно впливати на всі змінні стани [9]. Кінематичні параметри, виміряні по всіх напрямках можливих переміщень, є базою для визначення матриці стану об'єкта, досліджуваної для управління мобільною машиною. Керований об'єкт є повністю спостережуваним, якщо всі змінні стани входять у вираз для управляючої величини. Для того, щоб об'єкт був повністю спостережуваним, необхідно, щоб всі вимірювальні осі встановлених на нього акселерометрів відповідали всім можливим незалежним переміщенням, тобто степеням рухливості мобільної машини.

Таким чином, для оцінювання рівня спостережності мобільної машини пропонується показник – коефіцієнт спостережності, який рівняється відношенню сумарного числа недубльованих вимірювальних осей N_1 акселерометрів, встановлених на об'єкті, до числа його ступенів рухливості H

$$K_H = \frac{N_1}{H}. \quad (7)$$

При $K_H < 1$ об'єкт є неповністю спостережуваним, а при $K_H = 1$ – повністю спостережуваним.

Для обліку можливого дублювання вимірювальних осей акселерометрів пропонується досліджувати коефіцієнт дублювання

$$K_{\text{Дубл}} = \frac{N_1 + \sum_{i=1}^H N_{\text{Дубл}_i}}{H} = \frac{N_1}{H} \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^H N_{\text{Дубл}_i}}{N_1} \right), \quad (8)$$

де $N_{\text{Дубл}_i}$ – кількість дубльованих вимірювальних осей акселерометрів у напрямі i -го незалежного переміщення.

Враховуючи співвідношення (7), а також вводячи коефіцієнт дублювання вимірювальних осей акселерометрів по i -му незалежному переміщенню $K_{\text{Дубл}_i} = N_{\text{Дубл}_i} / N_1$, перетворимо вираз (8) до вигляду:

$$K_{\text{Дубл}} = K_H \left(1 + \sum_{i=1}^H K_{\text{Дубл}_i} \right). \quad (9)$$

При $K_{\text{Дубл}} > 1$ з'являється можливість підвищення точності вимірювань по всіх або частині напрямів незалежних переміщень за рахунок використання методу паралельних спостережень [7].

Розв'язанню задачі, яка враховує пружність підвіски і шини, можуть бути присвячені подальші дослідження.

Висновки. На основі визначення взаємозв'язку між числом степеней рухливості мобільної машини і необхідним числом вимірювальних осей запропонована методика вибору числа і місця установлення акселерометрів під час проведення різних динамічних випробувань.

Для оцінювання рівня спостережності об'єкта і точності проведення вимірювань запропоновані кваліметричні показники: коефіцієнт спостережності, що рівняється відношенню числа недубльованих осей встановлених акселерометрів до числа ступенів рухливості об'єкта і коефіцієнт дублювання, що дозволяє оцінити можливість підвищення точності вимірювань.

Запропонований метод підвищення точності вимірювань під час проведення випробувань захищено авторським свідоцтвом [10].

Література

1. Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин / [Н.П. Артемов, А.Т. Лебедев и др.]; под ред. М.А. Подригало. – Х. : Изд-во «Міськдрук», 2012. – 220 с.
2. Сысоева С. Автомобильные акселерометры / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2005. – № 8. – С. 12-18.
3. BOSCH. Автомобильный справочник/ пер. с англ. Первое русское издание. – М. : За рулем, 2000. – 896 с.

4. Соглашение о введении глобальных технических правил для колесных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах: Глобальные механические правила № 8 ECE/TRANS/180/Add 8. – 31 July 2008 – [Введены в Глобальный реестр 26.06.08] Организация Объединенных наций. – 116 с.
5. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний : ГОСТ Р 52302-2004. (Национальный стандарт РФ). – [Введен в действие 2004-30-12]. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2004. – 56 с.
6. Акселерометры низкочастотные линейные. Термины и определения: ГОСТ 18955-73. (Межгосударственный стандарт). – [Введен в действие 1973-29-06]. – М. : Издательство стандартов, 1973. – 11с.
7. Подригало М. Застосування методу паралельних спостережень при випробуваннях автомобілів / [М. Подригало, О. Полянський, Д. Клец, А. Коробко, А. Мостова] // Вісник Тернопільського національного технічного університету. Науковий журнал. – 2011. – Т. 16. –№1. – С. 57-62.
8. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин / И.И. Артоболевский. – М.: Наука, 1975. – 640 с.
9. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб. : Профессия. – 2004. – 725 с.
10. А. с. 53865. Твір науково-практичного характеру «Оцінювання придатності методів випробувань з використанням показників спостережності» / Подригало М. А., Коробко А. І., Радченко Ю. А. ; дата реєстрації 27.02.2014.

Аннотация

Предложено методику выбора количества и места установки акселерометров, а также качественные критерии оценки точности измерений при динамических испытаниях мобильных машин.

Summary

Methodology of quantity and installation location choice of accelerometers and their qualitative criteria for assessing the accuracy of measurements in vehicle dynamic tests are offered.