

Подригало М. А., д-р техн. наук; Артьомов М. П., канд. техн. наук.;
Клець Д. М., канд. техн. наук; Коробко А. І.

ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ І МІСЦЯ ЇХ УСТАНОВКИ ПРИ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАННЯХ МОБІЛЬНИХ МАШИН

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

У даний час одержали розвиток методи оцінки динаміки автомобілів на основі використання датчиків інерції або акселерометрів. Проте для отримання повної і достовірної інформації необхідне обґрунтування необхідного мінімального числа вимірювальних осей акселерометрів і раціональних точок їх установки. В цій статті визначений взаємозв'язок між числом ступенів рухливості об'єкту дослідження і кількістю акселерометрів. Визначені місця раціональної установки вказаних датчиків.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Дослідження використання акселерометрів при проведенні динамічних випробувань автомобілів набуло широкого поширення останніми роками [1, 2, 3]. Використання акселерометрів при випробуваннях автомобілів в даний час узаконено міжнародними [4] і національними стандартами низки країн [5, 6]. На сьогоднішній день актуальним є питання створення мобільних реєстраційно-вимірювальних комплексів на основі лінійних низькочастотних акселерометрів які призначені для оцінки параметрів руху автомобілів при кваліметричних випробуваннях.

Одним з найвідоміших приладів для дорожніх випробувань автомобілів, що виконані на основі акселерометрів, є прилад «Ефект-02». Цей прилад застосовується при перевірці гальмівних систем вантажних і легкових автомобілів, автобусів і автопоїздів, при проведенні автотехнічної експертизи транспортних засобів і в інших випадках, що вимагають оперативного контролю стану гальмівної системи. Цей прилад, як і аналогічний SPRINT SG2 використовує тільки одну вимірювальну вісь акселерометра.

При прямолінійному поступальному русі одна вимірювальна вісь достатня для отримання достовірної інформації про динаміку об'єкту дослідження. При плоскопаралельному русі використання однієї вимірювальної осі недостатнє. В роботі [1] для плоскопаралельного руху мобільних машин запропоновано використовувати два трикомпонентних акселерометри (кожен з яких має три взаємно перпендикулярних вимірювальних вісі). Проте у відомій літературі [1] відсутні рекомендації по раціональному вибору числа і місця установки акселерометрів залежно від задач, поставлених перед випробувачами.

Якщо кількість вимірювальних осей менше мінімально-необхідного, то результати випробувань малоінформативні, а випробовуваний об'єкт володіє недостатньою спостережністю. Якщо ж число вимірювальних осей більше мінімально-необхідного то деякі вимірювальні вісі дублюють одна одну. В цьому випадку можна підвищити точність вимірювання прискорень, використовуючи метод паралельних спостережень [7].

Мета і постановка задач дослідження. Метою дослідження є підвищення точності визначення параметрів руху мобільних машин при динамічних випробуваннях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити взаємозв'язок між числом ступенів рухливості об'єкту і мінімально-необхідним числом вимірювальних осей;
- визначити раціональну кількість лінійних низькочастотних акселерометрів і місць їх установки при різних фізичних моделях, представлення мобільної машини і в процесі випробувань.

Визначення мінімально-необхідного числа вимірювальних осей. Для отримання достовірної (повної) інформації про рухомий об'єкт необхідно, щоб кожній степені свободи вказаного об'єкту відповідала певна вимірювальна вісь.

Мінімально-необхідна кількість вимірювальних осей може бути визначена як

$$N = H, \quad (1)$$

де H – кількість ступенів рухливості об'єкту (визначається як кількість ступенів свободи щодо нерухомої ланки – стійки [8]).

При використанні багатокomпонентних акселерометрів з декількома вимірювальними осями кількість датчиків можна визначити таким чином

$$K_D = \frac{H}{n}, \quad (2)$$

де n – число осей чутливості в одному датчику.

Розглянемо рух матеріальної точки A в тривимірному просторі (рис. 1.).

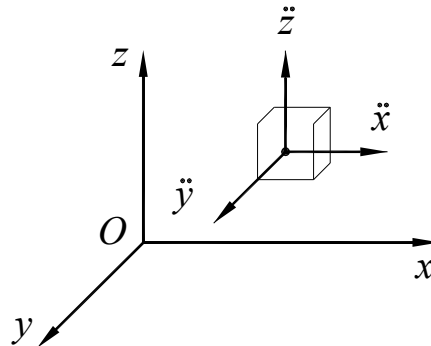


Рис. 1. Рух матеріальної точки в тривимірному просторі

Матеріальна точка має в тривимірному просторі три степені свободи. Для вимірювання параметрів її руху достатньо в точку A помістити один трикомпонентний акселерометр (з трьома взаємоперпендикулярними осями чутливості).

Матеріальне тіло в тривимірному просторі має шість ступенів свободи (рис. 2). При установці трикомпонентних акселерометрів їх необхідно два.

Для визначення параметрів руху тіла в трьох площинах розглянемо проєкції матеріального тіла на площини XOY , XOZ , ZOY (рис. 3).

Кутові швидкості обертання тіла щодо осей OX , OY , OZ можуть бути визначені залежно від величини лінійних прискорень таким чином (рис. 3):

$$\dot{\omega}_{XOY} = \dot{\omega}_Z = \frac{\ddot{Y}_A - \ddot{Y}_B}{|X_A - X_B|} = \frac{\ddot{X}_A - \ddot{X}_B}{|Y_A - Y_B|}, \quad (3)$$

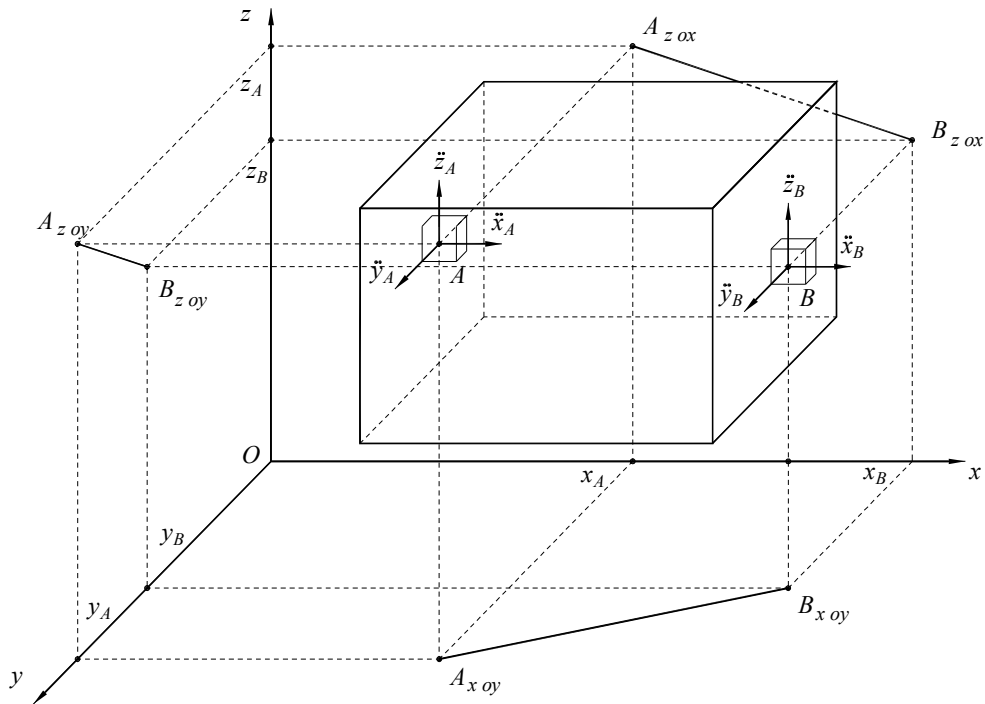


Рис.2. Рух матеріального тіла в тривимірному просторі: точки A і B – місця установки акселерометрів

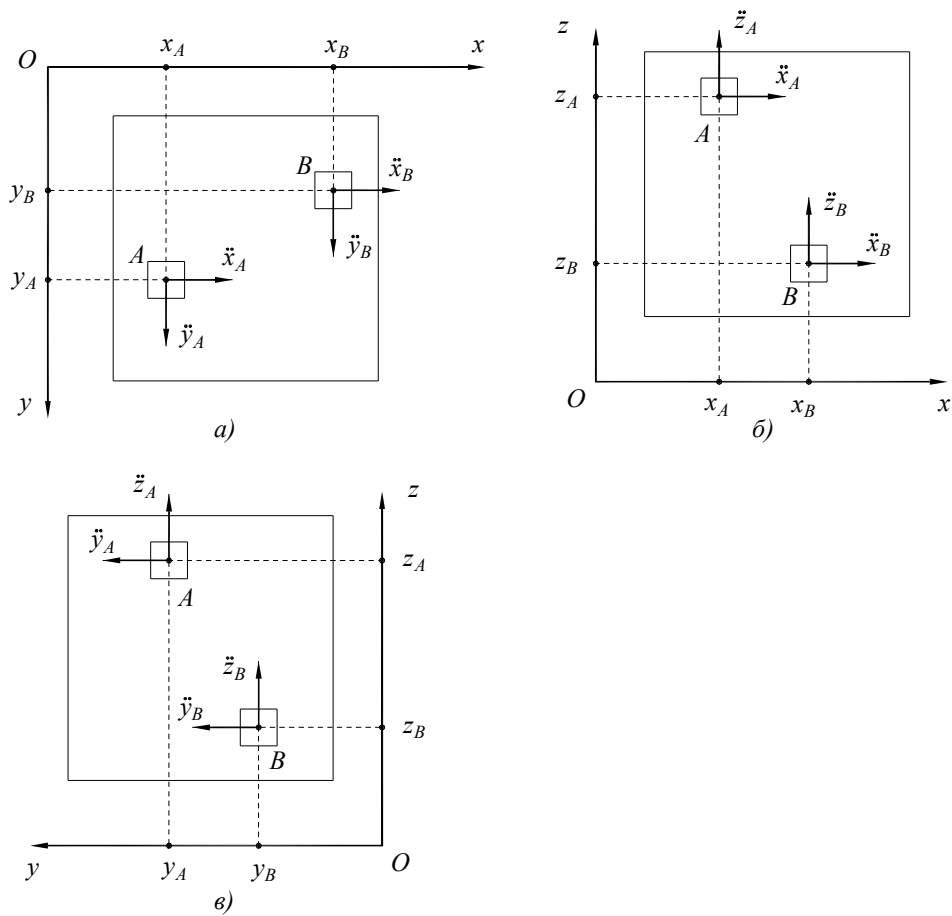


Рис.3. Рух матеріального тіла в площинах тривимірного простору: a – в площині XOY ; $б$ – в площині XOZ ; $в$ – в площині ZOY

$$\dot{\omega}_{XOZ} = \dot{\omega}_Y = \frac{\ddot{Z}_A - \ddot{Z}_B}{|X_A - X_B|} = \frac{\ddot{X}_A - \ddot{X}_B}{|Z_A - Z_B|}, \quad (4)$$

$$\dot{\omega}_{ZOY} = \dot{\omega}_X = \frac{\ddot{Y}_A - \ddot{Y}_B}{|Z_A - Z_B|} = \frac{\ddot{Z}_A - \ddot{Z}_B}{|Y_A - Y_B|}. \quad (5)$$

Знаючи параметри $\ddot{X}_A, \ddot{Y}_A, \ddot{Z}_A, \ddot{X}_B, \ddot{Y}_B, \ddot{Z}_B, \omega_X, \omega_Y, \omega_Z$ можна визначити параметри руху будь-якої точки матеріального тіла. Для цього в кожній з площин необхідно скласти рівняння плоскопаралельного руху.

Очевидно, що при русі матеріального тіла в двовірному просторі воно матиме три степені свободи. В цьому випадку для вимірювання параметрів руху достатньо трьох однокомпонентних акселерометрів (рис. 4 а), або одного двокомпонентного і одного однокомпонентного акселерометрів (рис. 4 б).

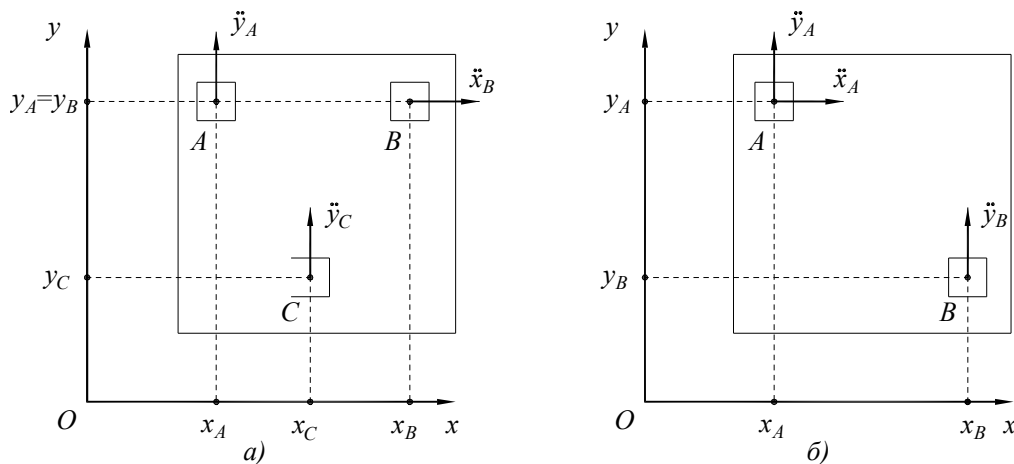


Рис. 4. Рух матеріального тіла в двовірному просторі:

а – установка трьох однокомпонентних акселерометрів;

б – установка одного двокомпонентного і одного однокомпонентного акселерометрів

Кутове прискорення обертання тіла в площині XOY

$$\dot{\omega}_{XOY} = \dot{\omega}_Z = \frac{\ddot{Y}_A - \ddot{Y}_C}{|X_A - X_C|}; \quad \text{– по схемі на рис. 4 а} \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_{XOY} = \dot{\omega}_Z = \frac{\ddot{Y}_A - \ddot{Y}_B}{|X_A - X_B|}; \quad \text{– по схемі на рис. 4 б.} \quad (7)$$

Знаючи параметри $\ddot{Y}_A, \ddot{Y}_C, \ddot{X}_B, \dot{\omega}_Z$, (рис. 4 а) і параметри $\ddot{Y}_B, \ddot{Y}_B, \ddot{X}_A, \dot{\omega}_Z$ (схема 4 б) можна скласти рівняння плоскопаралельного руху і визначити кінематичні параметри будь-якої точки матеріального тіла.

Визначення раціональної кількості лінійних низькочастотних акселерометрів і місць їх установки при випробуваннях мобільних машин. Визначення кількості ступенів рухливості просторового механізму, яким є мобільна машина, здійснюється за допомогою структурної формули Сомова-Малишева [8]

$$H = 6n_1 - 5p_V - 4p_{IV} - 3p_{III} - 2p_{II} - p_I \quad (8)$$

де n_1 – число рухомих ланок механізму щодо нерухомої ланки-стійки;

$P_V, P_{IV}, P_{III}, P_{II}, P_I$ – 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]).

Подальші дослідження проведемо на прикладі автомобіля. На рис. 5 наведена кінематична схема автомобіля, представленого як просторовий механізм. При проведенні аналізу механізму приймемо наступні допущення:

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

Прийняття цих допущень дозволяє вважати усі зв'язки, що накладаються на ланки автомобіля, утримуючими і голономними, а автомобіль – голономною механічною системою.

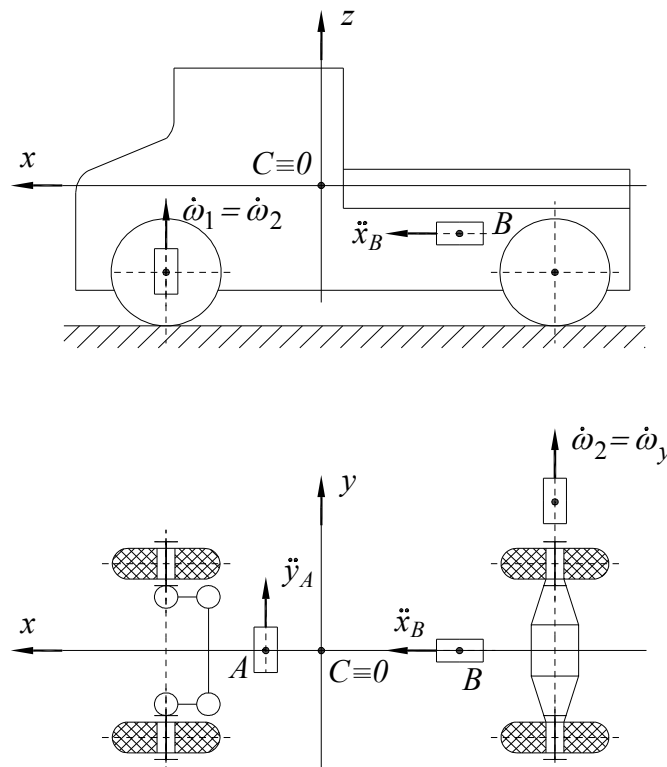


Рис.5. Кінематична схема автомобіля, представлена в двох площинах за відсутності ковзання в плямах контакту коліс з дорогою і схема установки датчиків

За наявності великої кількості кінематичних пар у просторових механізмів викликає труднощі визначення числа ступенів рухливості. Труднощі викликає визначення пасивних зв'язків і їх відкидання [8]. Тому визначення сумарного числа активних зв'язків, що накладаються на ланки автомобіля визначаємо через число ступенів рухливості [8].

$$K = 6n_1 - H \quad (9)$$

Очевидно, що при прийнятих допущеннях автомобіль має дві степені рухливості які визначаються числом незалежних рухів, створюваних двома вхідними ланками. Цими ланками є ведучі і керуючі колеса автомобіля. Рухом ведучого колеса є обертання навкруги своєї осі, а рухом керуючого колеса обертання навкруги осі шворня (рис. 5). Таким чином, щоб визначити всі параметри руху автомобіля в площині дороги XOY достатньо встановити два однокомпонентних акселерометра для вимірювання ку-

тових прискорень (як показано на рис. 5). 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 акселерометра для вимірювання кутового прискорення, встановлених на колесах, можна замінити двома лінійними низькочастотними акселерометрами, встановленими в кузові автомобіля (рис. 5).

Відповідно до співвідношення (9), на ланки автомобіля накладено 46 зв'язків (при $n_1=8$ – див. рис. 5).

При появі ковзання в плямах контакту коліс з дорогою додаються ще три ступені рухливості в тяговому режимі і п'ять ступенів рухливості в гальмівному режимі. В цьому випадку схема установки лінійних низькочастотних акселерометрів представлена на рис. 6.

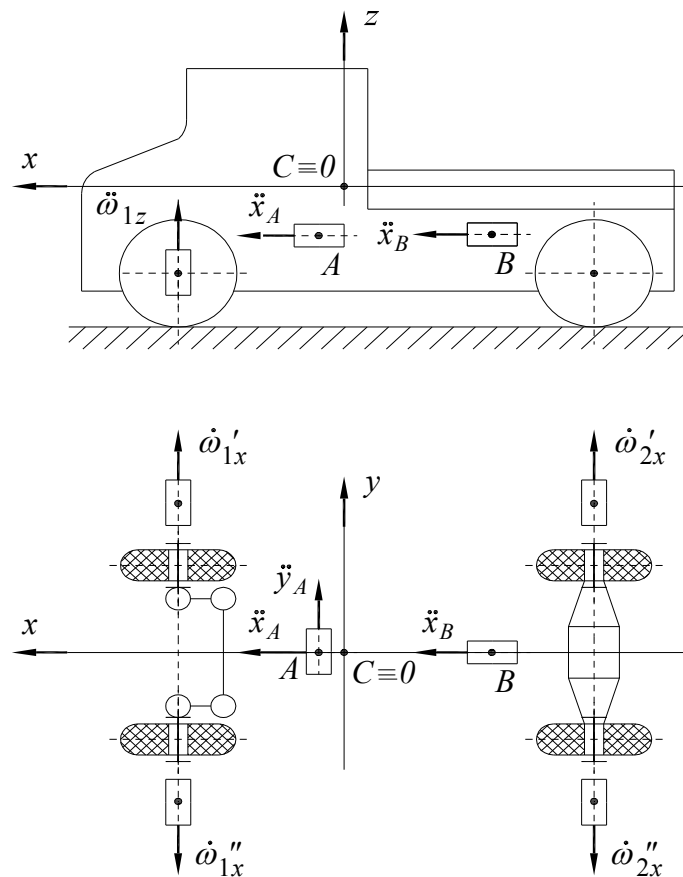


Рис.6. Кінематична схема автомобіля, представлена в двох площинах при ковзанні коліс в плямах контакту і схема установки датчиків

У тяговому режимі ковзання в плямах контакту ведених керуючих коліс відсутнє. В гальмівному режимі додаються дві ступені рухливості керуючих гальмівних коліс. У зв'язку з цим для гальмівного режиму руху автомобіля на схемі додано два датчики кутових прискорень передніх коліс, що визначають $\dot{\omega}'_{1x}$; $\dot{\omega}''_{1x}$.

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. Спостереження кінематичних параметрів по всіх координатах, що характеризують можливі переміщення, ро-

блять об'єкт повністю спостережуваним. При використанні акселерометрів як датчиків для системи управління рухом автомобіля це дозволяє зробити об'єкт повністю керованим.

Об'єкт називається повністю керованим, якщо існує така управляюча дія $U(t)$, 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 такий переклад, 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'єкту, досліджуваної для управління автомобілем. Керований об'єкт є повністю спостережуваним, якщо всі змінні стани входять у вираз для керованої величини. Для того, щоб об'єкт був повністю спостережуваним необхідно, щоб всі вимірювальні вісі встановлених на них акселерометрів відповідали всім можливим незалежним переміщенням, тобто степеням рухливості автомобіля.

Таким чином, для оцінки рівня спостережності автомобіля можна запропонувати показник – коефіцієнт спостережності рівний відношенню сумарного числа недубльованих вимірювальних осей N_1 акселерометрів, встановлених на об'єкті, до числа його ступенів рухливості H

$$K_H = \frac{N_1}{H}. \quad (10)$$

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

Для обліку можливого дублювання вимірювальних осей акселерометрів пропонується досліджувати коефіцієнт дублювання

$$K_{\text{Дубл}} = \frac{N_1 + \sum_{i=1}^H N_{\text{Дубл}}}{H} = \frac{N_1}{H} \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^H N_{\text{Дубл}}}{N_1} \right), \quad (11)$$

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

Враховуючи співвідношення (10), а також, вводячи коефіцієнт дублювання вимірювальних осей акселерометрів по i – му незалежному переміщенню

$$K_{\text{Дубл}} = \frac{N_{\text{Дубл}}}{N_1} \quad (12)$$

перетворимо вираз (11) до вигляду

$$K_{\text{Дубл}} = K_H \left(1 + \sum_{i=1}^H K_{\text{Дубл}} \right). \quad (13)$$

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].

Рішенню задачі підвищення і шин, що враховує пружність, можуть бути присвячені подальші дослідження.

Висновки. На основі визначення взаємозв'язку між числом ступенів рухливості автомобіля і необхідним числом вимірювальних осей запропонована методика вибору числа і місця установки акселерометрів при різних динамічних випробуваннях. Для оцінки рівня спостережності об'єкту нагляду і точності проведення вимірювань запропоновані коефіцієнт спостережності, рівний відношенню числа не дубльованих осей встановлених акселерометрів до числа ступенів рухливості об'єкту і коефіцієнт дублювання, що дозволяє оцінити можливість підвищення точності вимірювань.

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. *BOSH. Автомобильный справочник. Перевод 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*. – [Введен в действие 2004-30-12]. – М. : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2004. – 56 с. – (Национальный стандарт РФ). 6. *Акселерометры низкочастотные линейные. Термины и определения: ГОСТ 18955-73*. – [Введен в действие 1973-29-06]. – М. : Издательство стандартов, 1973. – 11с. – (Межгосударственный стандарт). 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. – Том 16. – №1. – С. 57-62. 8. *Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин* / И. И. Артоболевский. – М.: Наука, 1975. – 640 с. 9. *Бесекинский В. А. Теория систем автоматического управления* / В. А. Бесекинский, Е. П. Попов. – СПб. : Профессия. – 2004. – 725 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Metod parcial'nyh uskorenij i ego prilozhenija v dinamike mobil'nyh mashin* / [N. P. Artemov, A. T. Lebedev i dr.]; pod red. M. A. Podrigalo. – H. : Izd-vo «Mis'kdruk», 2012. – 220 s. 2. *Sysoeva S. Avtomobil'nye akselerometry* / S. Sysoeva // *Komponenty i tehnologii*. – 2005. – № 8. – S. 12-18. 3. *BOSH. Avtomobil'nyj spravocchnik. Perevod s angl. Pervoe russkoe izdanie*. – M. : Za rulem, 2000. – 896 s. 4. *Soglashenie o vvedenii global'nyh tehniceskikh pravil dlja kolesnyh transportnyh sredstv, predmetov oborudovanija i chastej, kotorye mogut byt' ustanovleny i/ili ispol'zovany na kolesnyh transportnyh sredstvah: Global'nye mehanicheskie pravila № 8 ESE/TRANS/180/Add 8*. – 31 July 2008 – [Vvedeny v Global'nyj reestr 26.06.08] Organizacija Ob#edinennyh nacij. – 116 s. 5. *Avtotransportnyje sredstva. Upravljaemost' i ustojchivost' Tehniceskie trebovanija. Metody ispytaniij : GOST R 52302-2004*. – [Vveden v dejstvije 2004-30-12]. – M. : Federal'noe agentstvo po teh-nicheskomu regulirovaniju i metrologii, 2004. – 56 s. – (Nacional'nyj standart RF). 6. *Akselerometry nizkochastotnye linejnye. Terminy i opredelenija: GOST 18955-73*. – [Vveden v dejstvije 1973-29-06]. – M. : Izdatel'stvo standartov, 1973. – 11s. – (Mezhgosudarstvennyj standart). 7. *Podrigalo M. Zastosuvannja metodu paralel'nih sposterezhen' pri viprobuvannjah avtomobiliv* / [M. Podrigalo, O. Poljans'kij, D. Klec, A. Korobko, A. Mostova] // *Visnik Ter-nopil's'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu. Naukovij zhurnal*. – 2011. – Tom 16. – №1. – S. 57-62. 8. *Artobolevskij I. I. Teorija mehanizmov i mashin* / I. I. Artobolevskij. – M.: Nauka, 1975. – 640 s. 9. *Besekerskij V. A. Teorija sistem avtomaticheskogo upravljenija* / V. A. Besekerskij, E. P. Popov. – SPb. : Professija. – 2004. – 725 s.

Подригало М. А., Артёмов М. П., Клец Д. М., Коробко А. І.

ВИЗНАЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ І МІСЦЯ ЇХ УСТАНОВКИ ПРИ ДИНАМІЧНИХ ВИПРОБУВАННЯХ МОБІЛЬНИХ МАШИН

Запропоновано методику вибору кількості і місця установки акселерометрів і критерії оцінки точності вимірювань при динамічних випробуваннях автомобілів.

Подригало М.А., Артёмов Н.П., Клец Д.М., Коробко А.И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ И МЕСТА ИХ УСТАНОВКИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

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

Podrigalo M., Artemov M., Kletz D., Korobko A.

DETERMINATION REQUIRED AMOUNT ACCELEROMETERS AND THEIR INSTALLATION IN DYNAMIC TESTS VEHICL

Method of choice quantity and installation location of accelerometers are offered. Their criteria for assessing the accuracy of measurements in dynamic tests are offered.

УДК 629.3.017.2

Подригало М. А., д-р техн. наук; Клец Д. М., канд. техн. наук; Назарько О.А.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ВЕДУЩЕГО КОЛЕСА АВТОМОБИЛЯ ПРОТИВ БОКОВОГО СКОЛЬЖЕНИЯ

Постановка проблемы. Боковое скольжение колес влечет за собой потерю автомобилем устойчивости и управляемости. Приложение к колесу крутящего или тормозного моментов приводит к увеличению касательной реакции в пятне контакта колеса с дорогой и, как следствие, – к снижению предельной по сцеплению боковой реакции дороги.

Традиционно для оценки соотношения между предельно допустимыми реакциями в плоскости контакта колеса с дорогой использовались круговые диаграммы или круги Камма. Однако развитие научных исследований показало, что использование круговой поляры трения не дает требуемых по точности результатов.

В настоящей статье с использованием известной ранее физической модели получена взаимосвязь между нормальной нагрузкой на шину, крутящим моментом на колесе и предельной по сцеплению боковой реакцией дороги.

Анализ последних достижений и публикаций. Исследованию взаимосвязи между предельными по сцеплению реакциями в плоскости дороги посвящены исследования [1-12]. В большинстве исследований для определения указанных реакций дороги использовалась так называемая «круговая диаграмма» или круг Кама [1, 2, 3]. В более поздних работах И. А. Бережного [4] предложена функция нагружения, устанавливающая взаимосвязь между направлением вектора суммарной реакции на колесо в плоскости дороги и направлением вектора линейной скорости колеса.

Наиболее подробно внутренняя и внешняя механика шины рассмотрена в работе [8]. В работе [7] предложен феноменологический подход для исследования качения деформируемого колеса. Сущность указанного подхода к любому явлению или предмету состоит в том, что предмет исследования представляется в виде некоего «черного ящика», поведение и свойства которого определяются его внешними характеристиками [7]. Задача исследования при помощи феноменологического подхода заключается в отыскании вида указанных характеристик, причем внутренние связи и структура «черного ящика» остаются вне рассмотрения [7]. Если группу переменных, входящих во внешние характеристики исследуемого объекта можно разделить на входные и выходные, то задача сводится к установлению связи между «выходом» и «входом» [7]. С использованием феноменологического подхода рядом авторов получены $\varphi - S$ диаграммы [5, 10]