

Павлюк В.І., Булік Ю.В.
Луцький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТРИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТІВ ІНЕРЦІЇ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ

Обґрунтовано можливість використання комбінованого способу визначення моментів інерції складових пасажирського транспортного засобу під час проектування, конструювання і моделювання експлуатаційних умов. Вказано на необхідність широкого впровадження програмного забезпечення для швидкого здійснення багатоваріантних розрахунків, підвищення точності результатів та зручності і візуалізації процесу дослідження. Встановлено, що визначені моменти інерції легкового автомобіля малого класу відносно вертикальної осі, яка проходить через центр мас автомобіля, отримані розрахунковими методами є зручними у використанні, але дають наближені результати. Загалом розрахункові методи залишаються громіздкими, що ускладнює їх застосування. Використання можливостей програмного забезпечення дозволяє значно скоротити процес розрахунків, збільшити їх точність, покращує відтворення реальних умов.

Ключові слова: легковий автомобіль, момент інерції, маса, просторове моделювання.

Постановка проблеми. Вивчення умов руху автомобіля відбувається як на стадії проектування, удосконалення конструкції так і під час його експлуатації. Поведінку автомобіля на дорозі неможливо описати без врахування його масово-інерційних параметрів та характеристик [1-5]. На інертність автомобіля впливає ступінь його завантаження і розміщення осіб, що використовують транспортний засіб, та багажу. Безумовно, суттєвим цей вплив є для легкових автомобілів невеликої маси. У математичному моделюванні руху автомобіля є потреба у визначенні моментів інерції транспортного засобу. Визначаючи їх теоретично, використовують різні залежності, які дозволяють отримати результат певною мірою наближено. Більш точним і затратним є встановлення величин експериментально у лабораторних умовах. У міру впровадження програмного забезпечення, зокрема і спеціального, вирішення значних за об'ємом робіт спрощується, а результати досліджень уточнюються. Перепоною використання спеціальних модулів є обмеження доступу ліцензійними умовами. Компромісним варіантом може бути комбіноване використання розрахункових методів і функцій 3D моделювання, що є доступними у комп'ютерних програмних комплексах. Так, наприклад, програми тривимірного моделювання, що використовуються на виробництві та у навчальному процесі, мають можливість визначення деяких основних масово-інерційних параметрів та характеристик, які слід використати у аналітичних дослідженнях. Використання такої можливості представлена на прикладі визначення моменту і радіусу інерції транспортного засобу навколо вертикальної центральної осі.

Аналіз досліджень і публікацій. Відомо, що момент інерції автомобіля під час обертального руху є мірою інертності твердого тіла відносно визначеної осі і у загальному випадку визначається як добуток маси тіла на радіус інерції цього тіла відносно заданої осі [6]. Для автомобіля цей вираз матиме такий вигляд:

$$I_j = M_{aj} \times i_j^2, \quad (1)$$

де M_{aj} – маса автомобіля певного ступеня завантаження (M_{acn} , M_{an} – споряджена, повна маса); i_j – радіус інерції, величина що відображає віддаль від осі обертання до точки автомобіля як тіла, в якій має бути зосереджена маса усього автомобіля за умови рівності моментів інерції точки і автомобіля відносно цієї осі [6].

У літературі зустрічаються різні аналітичні вирази для визначення моментів інерції автомобіля відносно центральних осей [1-5]. Для вивчення криволінійного руху транспортного засобу, з врахуванням геометричних розмірів поздовжнього розміщення центра мас легкового автомобіля відносно колісної бази, момент інерції відносно центральної вертикальної осі z може бути наближено визначений за залежністю (2) [1] чи (3) [3]:

$$i_{z1} = \sqrt{a \times b}, \quad (2)$$

$$i_{z2} = \frac{L}{2}, \quad (3)$$

де a – віддаль від центральної вертикальної осі (центра мас) до передньої осі автомобіля, м;
 b – віддаль від центральної вертикальної осі (центра мас) до задньої осі автомобіля, м;
 $L = a + b$ – база автомобіля, м.

На основі обробки і аналізу значної кількості результатів експериментальних досліджень були встановлені емпіричні коефіцієнти, врахування яких наближає теоретично розраховане значення моменту інерції до визначеного практично (4), (5) [3]:

$$i_{z3} = \sqrt{A_1 \times L^2}, \quad (4)$$

$$i_{z4} = \sqrt{A_2 \times L \times L_a}, \quad (5)$$

де $A_1 = 0,2116$, $A_2 = 0,1269$ – емпіричні коефіцієнти;

L_a – габаритна довжина автомобіля, м.

Цікавими є вирази для визначення радіусів інерції проєктованих автомобілів, отримані з використанням ймовірнісних методів, враховуючи закони розподілу яким підпорядковується розподіл маси автомобілів у межах габаритів транспортного засобу, бази та колії [4] та уточнені залежності з врахуванням зміщення центра елементарної маси в поперечній площині [5]. Так для випадку визначення ймовірних значень радіуса інерції відносно вертикальної осі виведені відповідні залежності (6, 7) та для визначення його середнього значення у припущенні усіченого нормального закону розподілу i_z^2 (8)[5]:

$$i_{z5} = \sqrt{\frac{a \times b}{2} + \frac{B^2}{12} \pm \frac{a \times b}{6}}; \quad (6)$$

$$i_{z6} = \sqrt{\left(a \times b + \frac{B^2}{4} \times \frac{b}{a}\right) \times \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{6}\right)}, \quad (7)$$

$$\bar{i}_{z6} = \sqrt{\frac{b}{a} \times \left(\frac{a^2}{2} + \frac{B^2}{8}\right)}. \quad (8)$$

Метою роботи є визначення величини моментів інерції легкового автомобіля малого класу відносно центральної вертикальної осі його обертання та обґрунтування потреби використання комбінованого способу при визначенні моментів інерції автомобіля з різним завантаженням. Досягнути поставленої цілі можна врахуванням роззосередження мас водія і пасажирів, що становлять значну частку загальної маси транспортного засобу з поєднанням можливостей просторового комп'ютерного моделювання і аналітичних, розрахункових методів.

Результати досліджень. Розрахункові залежності для визначення радіуса інерції, як правило, передбачають симетричність і рівномірність розподілення маси автомобіля у межах його бази та колії, можуть бути визначені для певних умов (2 – 8). Наприклад, за прийнятими припущеннями

розподілення маси на осях автомобіля для приблизного визначення моменту інерції, залежність (3), не містить співвідношення a/b , а так і навіть теоретично не може відобразити ступеня завантаження автомобіля.

Для прикладу, розраховано значення радіуса інерції для автомобіля малого класу ЗАЗ-1102: $M_{acn} = 727$ кг; $M_{an} = 1127$ кг; $L = 2,320$ м; $B = 1,310$ м; $a_{cn} = 0,903$ м; $b_{cn} = 1,417$ м; $a_n = 1,132$ м; $b_n = 1,188$ м [7]. Використовуючи вище згадані залежності, отримані результати розрахунку значень радіусів інерції для повного завантаження автомобіля та наведені для порівняння у таблиці 1.

Таблиця 1 – Інерційних показників для автомобіля малого класу ЗАЗ-1102

Розрахункова залежність та значення параметра					
i_{zj} (M_n)	$i_{z1} = \sqrt{a \times b}$	$i_{z2} = \frac{L}{2}$	$i_{z3} = \sqrt{A_1 \times L^2}$	$i_{z4} = \sqrt{A_2 \times L \times L_a}$	$\bar{i}_{z6} = \sqrt{\frac{b}{a} \times \left(\frac{a^2}{2} + \frac{B^2}{8} \right)}$
	1,16	1,16	1,07	1,04	0,94
I_{zj} , H^*M^2	$I_{zj} = M_a \times i_{zj}^2$				
	1515	1517	1284	1228	1011

З врахуванням додаткового вантажу ΔM_6 у багажному відділенні, що знаходиться на відстані l_6 від центральної вертикальної осі z [3]:

$$I_z = M_a \times i_z^2 + \Delta M_6 \times l_6^2 \quad (9)$$

Автомобілі малих класів мають певну компоновку визначену габаритними обмеженнями, однак місткість значної кількості з них передбачає розташування трьох пасажирів у другому ряді сидінь та наявність багажу у багажному відділенні. Наявність в автомобілі водія і чотирьох пасажирів та багажу у відведеному відділенні призводить підвищення навантаження на задню вісь майже у двічі. Виникає зацікавлення, яка частка моменту інерції автомобіля повної маси припадає на водія і пасажирів. У технічних характеристиках на автомобіль відомості про моменти інерції, як правило, не зазначаються і за відсутності 3D-моделі єдиним точним методом є проведення експериментальних досліджень [3, 5].

Маючи змогу використати модель манекена водія та пасажирів, можна провести аналіз деяких інерційних показників у системі Creo Parametric. Аналіз вимог і рекомендацій щодо конструкції та компоновки автомобіля дозволив прийняти ряд припущень. Так у дослідженнях прийняті параметри манекена 5%-го рівня репрезентативності масою 60 кг. У галузевому стандарті на методи визначення показників мас автотранспортних засобів, для легкових автомобілів зазначена маса водія чи пасажирів 68 кг. Манекени 50% та 95% рівня репрезентативності мають показники, що перевищують нормативні значення параметрів водія і пасажирів за масою та габаритами тому у дослідженнях не розглядалися. Таким чином відхилення маси вибраного манекена від норми становить 11,8%.

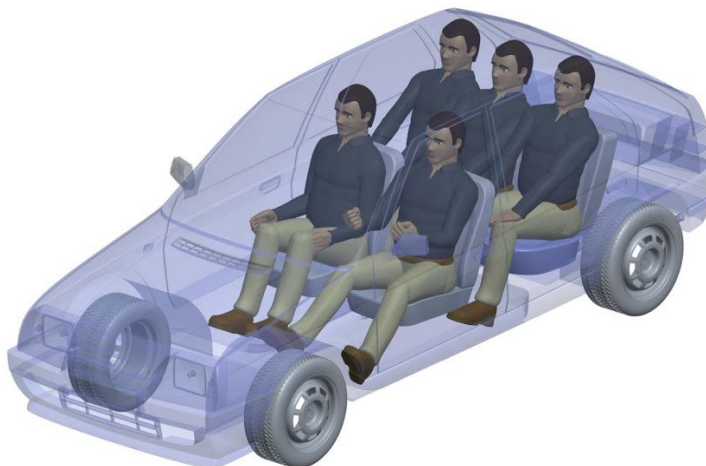


Рис. 1 – Розміщення манекенів водія і пасажирів у автомобілі малого класу з використанням просторового моделювання

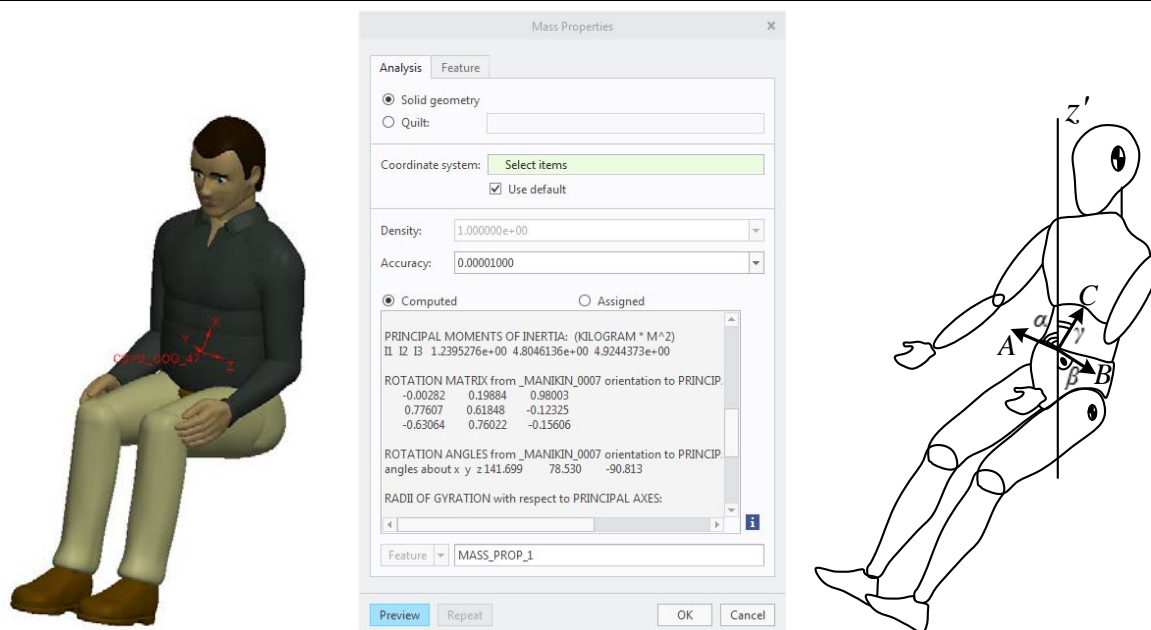


Рис. 2 – Зразок інтерфейсу програми та схема до визначення моментів інерції тіла водія (пасажира) за кутами зв'язку вісі z' з головними центральними осями та відомими моментами інерції (A, B, C)

Моменти інерції відносно головних центральних осей – A, B, C (рис.2) визначаються програмно. Так для водія $C_I = 1,69 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $A_I \approx B_I = 5,89 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $\gamma_I = 53^\circ$; $\alpha_I = 90^\circ - \gamma_I$. Оскільки вісь z' проходить через центр мас тіла манекена, а кут $\beta = 90^\circ$, момент інерції відносно цієї осі [6]:

$$I'_{Zj(1-5)} = A_j \times \cos^2 \alpha_j + C_j \times \cos^2 \gamma_j. \quad (10)$$

Моменти інерції відносно вертикальної осі, що проходить через центр мас водія, становить $I_I = 4,37 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Аналогічно визначаються моменти інерції для кожного з чотирьох пасажирів.

Програма дозволяє визначити моменти відносно головних центральних осей для системи водій разом з пасажиром з початком координат у точці $O_{e,n}$: $C_{e,n} = 88,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $A_{e,n} = 37,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $\gamma_{en} = 12,5^\circ$; $\alpha_{en} = 180^\circ - 90^\circ - \gamma_{en}$. Звідси розраховано момент інерції відносно вертикальної осі у точці $O_{e,n}$, який матиме значення – $I_{Zen} = 86,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

За теоремою про моменти інерції твердого тіла відносно паралельних осей з врахуванням віддалей d_j (рис. 3) можна визначити моменти інерції тіл водія і пасажирів відносно будь якої вертикальної осі, зокрема центральної осі автомобіля у точці O_a (рис. 3) [6]:

$$I_{ZOa1-5} = I'_{ZI-5} + M_{1-5} \times d_{1-5}^2. \quad (11)$$

де I'_{ZI-5} – момент інерції тіла водія чи пасажира відносно центральної вертикальної осі, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

M_{1-5} – маса тіла водія чи пасажира, кг ;

d_{1-5} – відстань від центра маси тіла водія чи пасажира до будь якої вертикальної осі системи, м .

Аналогічно (11) момент інерції водія разом з пасажиром відносно вертикальної осі у центрі мас автомобіля I_{ZOa} визначиться:

$$I_{ZOa} = I_{Zen} + M_{e,n} \times l_2^2. \quad (12)$$

де I_{Zen} – момент інерції відносно вертикальної осі у початку координат головних центральних осей для системи водія з пасажиром разом, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

$M_{e,n}$ – загальна маса водія та пасажирів, кг ;

l_2 – відстань від центра загальної маси системи водія та пасажирів до центральної вертикальної осі автомобіля, м .

Виходячи з обмежень компоновки автомобіля (рис. 3) можна прийняти наступні геометричні розміри: B_1 – для автомобілів малого класу 1,2 – 1,3м; $l_1 \approx 0,8$ м [8]; $l_2 = b - (l_3 + l_4)$; довжина l_3 прийнята з компоновки автомобіля та другого ряду сидінь відносно колісної арки – $l_3 = r_k + 0,1 \dots 0,2$ м; l_4 визначиться з відношення маси водія і пасажирів до загальної маси присутніх в авто:

$$l_4 = \frac{\sum M_{1-2}}{\sum M_{1-5}} \times l_1. \quad (13)$$

де $\sum M_{1-2}$ – маса водія та переднього пасажира, кг;

$\sum M_{1-5}$ – загальна маса водія та пасажирів, кг;

l_1 – відстань між рядами сидінь у автомобілі, м.

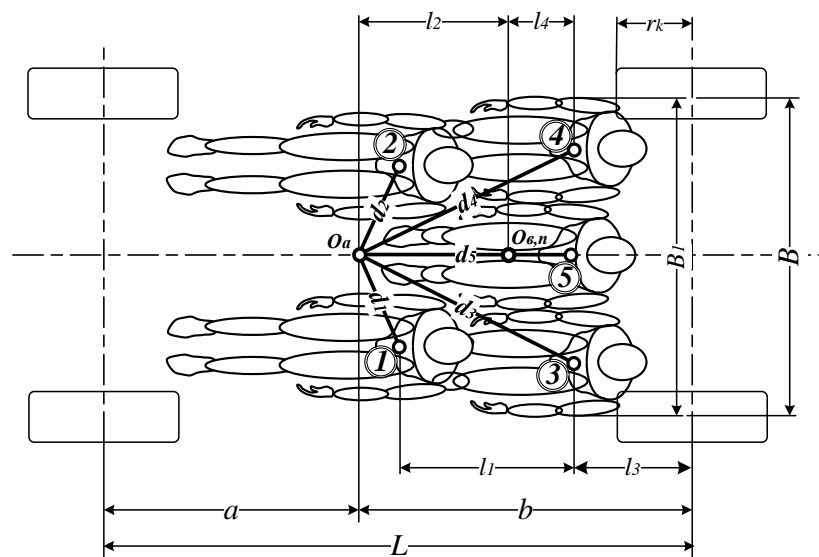


Рис. 3. Схема до визначення місцезнаходження водія та пасажирів та характерних відстаней у плані автомобіля

Для випадку зображеному на схемі $l_4 = 2/5 \times l_1$. Звідси, відповідно до прийнятих припущень, момент інерції водія разом з пасажиром відносно вертикальної осі у центрі мас вибраного автомобіля – $I_{ZOa} = 150 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Отже, момент інерції водія і пасажирів разом (масою 60 кг кожен) відносно вертикальної осі у центрі мас автомобіля становить від 10...15% від моменту інерції автомобіля відносно центральної вертикальної осі завантаженого автомобіля за даними таблиці 1.

Момент інерції спорядженого автомобіля відносно його центральної вертикальної осі I_{Zcn} можна отримати відніманням моменту інерції групи людей I_{ZOa} від розрахунково визначеного для завантаженого автомобіля моменту I_Z та подальшим перерахунком моментів відносно вертикальних осей паралельно зміщених вздовж автомобіля $l_e = a_n - a_{cn}$ у наслідок розвантаження.

$$I_{Zcn} = (I_Z - I_{ZOa}) - M_{cn} \times l_e^2. \quad (14)$$

За початковими даними вибраного автомобіля і розрахунковими інерційними показниками (табл. 1) цей момент $I_{Zcn} = 823 \dots 1328 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Визначення моментів інерції навколо інших центральних осей x, y потребує встановлення координат (висоти) центра мас відповідно завантаженого автомобіля. Загальні моменти інерції автомобіля визначаються компоновкою автомобіля щодо об'ємів кузова, розміщенням силового агрегату і трансмісії, елементів ходової частини, багажу і ємкості паливного бака. Визначення зазначених параметрів і характеристик можуть бути предметом подальших досліджень.

Висновки. Визначені значення моментів інерції вибраного легкового автомобіля малого класу відносно центральної вертикальної осі його обертання за різними розрахунковими залежностями

мають значні розбіжності, що вказує на можливість їх використання як наближених. Більш точні результати можна отримати, використовуючи аналіз тривимірних моделей. Отримані моменти інерції навколо вертикальних осей для системи з п'яти осіб (водія та пасажирів, маса особи 60 кг). Встановлено, що частка моменту інерції такої системи відносно центральної вертикальної осі завантаженого легкового автомобіля малого класу (ЗАЗ-1102) становить 10...15% від його розрахункового моменту інерції відносно цієї ж осі.

У дослідженнях складних систем, за відсутності програмних комплексів з можливістю повного аналізу масово-інерційних характеристик, слід користуватися функціями розрахунку маси, моментів інерції та інших параметрів для складових цих систем, що є доступними у багатьох програмах просторового моделювання.

1. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
2. Эллис Д.Р. Управляемость автомобиля: Пер. с англ. /Д.Р.Эллис.— М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
3. Проикшат А. Шасси автомобиля: Типы приводов / Под ред. Й. Раймпеля; Пер.с нем. В. И. Губы; Под ред. А.К.Миллера.— М.: Машиностроение, 1989. – 232 с.: ил.
4. Подригало М.А. Определение радиусов инерции автомобиля на стадии его проектирования / М.А. Подригало, В.П. Волков // Автомобильная промышленность: научно-техн. журнал. – 2003. – №6. – С. 19–22.
5. Подригало М.А. Уточнення імовірнісного методу визначення радіусів інерції колісної машини / М.А. Подригало, Є.О. Дубінін // Автомобільний транспорт, вып. 37, 2015. URL: http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/1181/1/%D0%90%D0%A2_37_18.pdf.
6. Яблонский А.А. Курс теоретической механики/ А.А. Яблонский. Ч. II. Динамика: учебник для техн. вузов. – 6-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 1984. – 423 с.: ил.
7. Фучаджи К.С. Автомобиль ЗАЗ-1102 «Таврия». Устройство, техническое обслуживание и устранение неисправностей / К.С. Фучаджи. – М.: Патриот, 1992. – 312 с.: ил.
8. Автомобили и тракторы. Основы эргономики и дизайна: Учебник для студентов вузов/ И.С. Степанов, А.Н. Евграфов, А. Л. Карунин, В.В. Ломакин, В.М. Шарипов; Под общ. ред. В.М. Шарипова. - М.: МГТУ «МАМИ», 2002. - 230 с.

REFERENCES

1. Litvinov A.S. (1971). Upravlyaemost' i ustoychivost' avtomobilya [Vehicle handling and stability], Moscow, Mashinostroenie Publ., 416 [in Russian].
2. Ellis J.R. (1975). Upravlyaemost'. London: Business Books Limited Publ., 1969. 198 p. [avtomobilya Vehicle dynamics] (Russ. ed.: G.K. Mirzoev Upravlyaemost' avtomobilei), Moscow, Mashinostroenie Publ., 216 [in Russian].
3. Proykshat A. (1989). Shassi avtomobilya: Tipy privodov / Pod red. Y. Raympelya; Per.s nem. V.I. Guby; Pod red. A.K.Millera. V.I. Guba; Ed. A.M.Miller [Chassis of the car: Types of drives / Ed. J. Reimple; Translated from German]. Vogel-Buchverlag, Wьrzburg. 1985, Moscow: Mashinostroyeniye. Publ. - 232 [in Russian].
4. Podrigalo M.A., Volkov V.P. (2003). Opredelenie radiusov inertsiy avtomobilya na stadii ego proektirovaniya [Determination of vehicles radii of inertia at the design stage]. Avtomobil'naya promyshlennost' – Car industry, Vol. 6, pp. 19-22. [in Russian].
5. Podrigalo M.A., Dubinin Ye. (2015). Refinement of the probabilistic method of determining the radii of wheel vehicle inertia [Electron resource] [Utochnennyya imovirnisnoho metodu vyznachennyya radiusiv inertsiyi kolisnoyi mashyny]. Avtomobil'nyy transport, Vol. 37. URL: http://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/bitstream/123456789/1181/1/%D0%90%D0%A2_37_18.pdf [in Ukrainian].
6. Yablonsky A.A. (1984). Kurs teoreticheskoy mekhaniki. [Course of Theoretical Mechanics] Dinamika: uchebnik dlya tekhn. vuzov. – 6-ye izd., ispr.]. Moscow. Higher education Publ., 423 [in Russian].
7. Fuchadzh K.S. (1992). Avtomobil' ZAZ-1102 «Tavriya». Ustroystvo, tekhnicheskoye obsluzhivaniye i ustraneniye nespravnostey [The car ZAZ-1102 "Tavria". Device, maintenance and troubleshooting]. Moscow, Patriot Publ., 312 [in Russian].
8. Avtomobili i traktory. Osnovy ergonomiki i dizayna (2002) : A Textbook for University Students [Cars and tractors. Fundamentals of Ergonomics and Design] / I.S. Stepanov, A.N. Evgrafov, AL Karunin, V.V. Lomakin, V.M. Sharipov; Ed. V.M. Sharipov. Uchebnik dlya studentov vuzov Moscow: MGTU "MAMI", 230 p. [in Russian].

Павлюк В.І., Булік Ю.В. Использование программного обеспечения трехмерного моделирования для определения моментов инерции легковых автомобилей.

Обоснована возможность использования комбинированного способа определения моментов инерции, составляющих пассажирского транспортного средства во время проектирования, конструирования и моделирования эксплуатационных условий. Указана необходимость широкого внедрения программного обеспечения для возможности быстрого осуществления многовариантных расчетов, повышение точности результатов и удобства и визуализации процесса исследования. Установлено, что определенные моменты инерции легкового автомобиля малого класса относительно вертикальной оси, проходящей через центр масс

автомобиля, полученные расчетными методами, удобны в использовании, но дают приближенные результаты. В общем случае расчетные методы остаются громоздкими, что усложняет их применение. Использование возможностей программного обеспечения позволяет значительно сократить процесс расчетов, увеличить их точность, улучшает воспроизведения реальных условий.

Ключевые слова: легковой автомобиль, момент инерции, масса, пространственное моделирование.

V. Pavliuk, Y. Bulik. Use of the software of 3d-modeling for the of several moments of light care inerection.

The possibility of using a combined method for determining the moments of inertia of components of a passenger vehicle during the design, construction and modeling of operating conditions is substantiated. The necessity of widespread introduction of software for the possibility of rapid implementation of multivariate calculations, increase of accuracy of results and convenience and visualization of the research process has been confirmed. It is established that certain moments of inertia of a small class car relative to the vertical axis passing through the center of the car's mass, obtained by calculation methods, are convenient to use, but give approximate results. In general, the calculation methods remain cumbersome, which complicates their application. The use of software capabilities can significantly reduce the process of calculations, increase their accuracy, improve the reproduction of real conditions.

A 3D-modeling software package was used to determine the inertia of a passenger car, driver and passengers.

Used cars of the small class, dummies with parameters of the driver and passengers. The method of the combined method of determining the moments of inertia is given in the conditions when the data obtained by the three-dimensional modeling are used for analytical calculations.

Calculated moments of inertia relative to the central vertical axes of the equipped and loaded passenger car of the small class on the example of ZAZ-1102.

It was established that the moment of inertia of the driver and the passengers together (60 kg each) relative to the vertical axis in the center of the car's mass is from 10 to 15% of the moment of inertia of the car relative to the central vertical axis of the loaded small class car, which is considered in the studies.

Research results can be used in the scientific and educational process and in production during design, construction of automobiles and modeling of its operating conditions.

Keywords: passenger car, moment of inertia, mass, spatial modeling.

АВТОРИ:

ПАВЛЮК Василь Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький НТУ, e-mail: pavliuk_v.i@ukr.net

БУЛІК Юрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій, Луцький НТУ, e-mail: by_lutsk@ukr.net

АВТОРЫ:

ПАВЛЮК Василий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий НТУ, e-mail: pavliuk_v.i@ukr.net

БУЛИК Юрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортных технологий, Луцкий НТУ, e-mail: by_lutsk@ukr.net

AUTHORS:

Vasyl *PAVLIUK*, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: wasilijpi@mail.ru

Yurii *BULIK*, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of Motor Cars and Transport Technologies Department, Lutsk National Technical University, e-mail: by_lutsk@ukr.net

Стаття надійшла в редакцію 13.05.2018р.