

О. Г. Пелех¹
Р. В. Зінько¹
А. П. Поляков²
Ю. Ю. Скварок³
О. М. Бадейнов⁴

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДВІСКИ АВТОМОБІЛЯ

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Вінницький національний технічний університет

³Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І. Франка

⁴Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз

Плавність ходу, керованість, курсову стійкість і безпеку руху транспортного засобу визначається параметрами підвіски автомобіля. На динамічні показники автомобіля, рівень комфорту та ресурс елементів ходової частини впливає відповідність силових характеристик пружних елементів підвіски розрахунковим параметрам.

У статті наведено результати експериментального дослідження параметрів пружних елементів підвіски автомобіля та визначення залежності коефіцієнта жорсткості від величини деформації. Проаналізовано теоретичний і експериментальні методи визначення жорсткості гвинтових пружин та обґрунтовано вибір стендового методу з використанням тензометричного датчика навантаження. Розроблено методику проведення випробувань із поетапним навантаженням та розвантаженням пружини з фіксацією переміщення і прикладеної сили.

Експериментально досліджено дві пружини задньої підвіски – з постійним і змінним діаметром дроту. Для кожного зразка отримано аналітичні залежності жорсткості від деформації при навантаженні та розвантаженні, визначено середньоквадратичну і відносну похибку апроксимації. Встановлено, що пружина з постійним діаметром дроту характеризується більш стабільною (квазі-лінійною) зміною жорсткості, тоді як пружина зі змінним діаметром має виражену нелінійну (прогресивну) характеристику. Виявлено наявність гістерезисних явищ, що зумовлюють відмінність силових характеристик при навантаженні та розвантаженні.

У статті наведено результати експериментального дослідження параметрів силових характеристик пружних елементів підвіски автомобіля з використанням стенду з тензометричною системою вимірювання навантаження. Визначення локальних значень коефіцієнта жорсткості в усьому робочому діапазоні деформацій пружин, а також аналіз процесів навантаження і розвантаження забезпечується запропонованою методикою, яка дозволяє оцінювати відповідність пружин нормативним характеристикам, визначати мінімальні та максимальні значення коефіцієнта жорсткості, аналізувати гістерезисні явища та залишкові деформації, виконувати підбір пар пружин з близькими характеристиками для встановлення на одну вісь автомобіля.

Отримані результати можуть бути використані для діагностики технічного стану пружин, підбору пар елементів на одну вісь, оптимізації конструктивних параметрів та налаштування характеристик підвіски транспортних засобів.

Ключові слова: підвіска автомобіля; гвинтова пружина; коефіцієнт жорсткості; експериментальні дослідження; тензодатчик; нелінійна характеристика; гістерезис; деформація; силова характеристика.

Вступ

Підвіска автомобіля є однією з ключових систем, що визначає плавність ходу, керованість, курсову стійкість і безпеку руху транспортного засобу. Одним із основних її елементів є гвинтова пружина, яка забезпечує сприйняття та перерозподіл вертикальних навантажень, демпфування коливань і підтримання необхідного дорожнього просвіту. Відповідність силових характеристик пружних елементів розрахунковим параметрам безпосередньо впливає на динамічні показники автомобіля, рівень комфорту та ресурс елементів ходової частини.

Теоретичне визначення жорсткості циліндричної гвинтової пружини [1] ґрунтується на відомих аналітичних залежностях, що враховують модуль зсуву матеріалу, геометричні параметри дроту та навивки, а також кількість робочих витків. Проте в реальних умовах експлуатації силова характеристика пружини може відхилитися від теоретично розрахованої внаслідок технологічних допусків, термічної обробки, залишкових напружень, втомних явищ, корозійного впливу та локальних

пластичних деформацій. Особливо це стосується пружин зі змінною геометрією (конічних, бочкоподібних, зі змінним діаметром дроту), для яких жорсткість є нелінійною функцією деформації.

У зв'язку з цим актуальним є проведення експериментальних досліджень, спрямованих на визначення реальних значень коефіцієнта жорсткості пружин підвіски в усьому робочому діапазоні навантажень, а також аналіз їх зміни під час навантаження і розвантаження з урахуванням гістерезисних явищ. Особливу практичну цінність мають методики, що дозволяють визначати локальні значення жорсткості в заданих точках характеристики та оцінювати залишкову деформацію після прикладення максимального навантаження.

Метою роботи є експериментальне дослідження параметрів пружних елементів підвіски автомобіля та визначення залежності коефіцієнта жорсткості від величини деформації для пружин різної конструкції – з постійним і змінним діаметром дроту. Для досягнення поставленої мети було розроблено та використано випробувальний стенд із тензOMETричною системою вимірювання навантаження, що забезпечує можливість реєстрації силових параметрів у широкому діапазоні стискування.

Об'єктом дослідження є пружини задньої підвіски легкового автомобіля, а предметом – їх силові характеристики та закономірності зміни жорсткості під дією зовнішнього навантаження. Отримані результати можуть бути використані для діагностики технічного стану пружин, удосконалення їх конструкції, підбору парних елементів на одну вісь, а також для оптимізації параметрів підвіски транспортних засобів різного призначення.

Результати дослідження

Методи дослідження жорсткості пружини підвіски автомобілів [2]. Теоретичний метод визначення жорсткості пружини:

$$k = \frac{Gr^4}{4nR^3} = \frac{Gd^4}{8nD^3},$$

де G – модуль зсуву; n – кількість витків; r – радіус прутка; d – діаметр прутка; R – радіус навивки; D – діаметр навивки.

Для пружинної сталі модуль зсуву знаходиться в межах від 77 до 85 ГПа. Застосовується для циліндричних пружин з сталою жорсткістю.

При експериментальному методі визначення жорсткості пружини використовується ручний прес, ваги і вимірювальна лінійка. На ваги встановлюють дерев'яну плиту, площею більше площі основи пружини, на яку встановлюють пружину. На верхню основу пружини накладають іншою дерев'яною плитою і заміряють довжину пружини. Плити з пружиною встановлюють на ручний прес і навантажують пружину з зусиллям до моменту контакту витків пружини, це зусилля залежить від параметрів пружини і визначає її жорсткість. При цьому методі визначається тільки жорсткість пружини при максимальному навантаженні.

Метод дослідження жорсткості пружини за допомогою розробленого стенду для перевірки пружин. Стенд може використовуватися для діагностики та вимірювання навантажень циліндричних, конічних і бочкоподібних пружин підвіски автомобілів невеликої вантажності, перевірки їх працездатності та визначення відхилення геометричних розмірів і перекосів, що виникають при роботі пружини в складі підвіски.

Призначення стенду:

- для перевірки відповідності силових характеристик пружин вимогам нормативно-технічної документації;
- для розроблення та модернізації пружин, зокрема виконання оперативних вимірювань під час доведення параметрів у процесі випробувань;
- для діагностування пружин підвіски в умовах сервісних станцій технічного обслуговування – з метою оцінювання їх працездатності під час комплексного ремонту ходової частини автомобіля;
- для підбору пружин у спортивних і тюнінгованих автомобілях – з метою точного налаштування підвіски відповідно до характеристик траси, розподілу маси автомобіля та забезпечення максимального зчеплення коліс із покриттям і мінімізації часу проходження кола;
- для здійснення вхідного контролю – перевірки відповідності пружин заявленим характеристикам під час закупівлі партій продукції та постачання на складальні лінії;

– для гарантійного аналізу – встановлення обґрунтованості рекламаций щодо явних або прихованих дефектів, що виникли в процесі експлуатації.

Функціональні можливості станду.

Стенд забезпечує виконання таких видів випробувань:

- перевірку за встановленим стандартним переліком параметрів. У стандартній базі передбачені штатні пружини автомобіля «Славути» та їх нормативні значення зусиль;
- визначення жорсткості пружини відповідно до моделі, заданої користувачем. У моделі можуть задаватися дві контрольні точки – за значенням сили або за висотою;
- проведення контролю в одній заданій точці (за висотою чи зусиллям) із визначенням жорсткості поблизу цієї точки;
- виконання довільних вимірювань із плавним регулюванням навантаження стиснення.



Рис. 1. Стенд для контролю характеристик пружин

Таблиця 1

Основні технічні характеристики станду

Параметр	Значення
Загальний діапазон вимірювання зусиль, кг	0–2000
Максимальна похибка вимірювання зусилля, кгс	±2
Найбільша висота досліджуваних пружин, мм	500
Діапазон вимірювання висоти пружини, мм	100–500
Максимальна похибка вимірювання висоти, мм	±0,2
Діапазон внутрішніх діаметрів пружин, мм	68–150
Габаритні розміри (В × Ш × Г), мм	1980 × 750 × 400

Стенд дозволяє:

- порівнювати параметри пружин із нормативними даними виробника та визначати їх придатність до експлуатації; здійснювати порівняння пружин, встановлених на одній осі автомобіля, де різниця зусиль зазвичай не повинна перевищувати 12 кг (залежно від марки автомобіля);
- формувати пару пружин з максимально близькими характеристиками для встановлення на одну вісь;
- виявляти перекося та геометричні відхилення пружини під час стиснення;
- визначати коефіцієнт жорсткості в будь-якій точці робочого діапазону по висоті;

- оцінювати залишкову деформацію (усадку) після прикладення максимального навантаження;
- підбирати пружини для зміни кліренсу автомобіля – як для його збільшення, так і для зменшення;
- перевіряти нові пружини перед їх монтажем на транспортний засіб.

Запропонований метод забезпечує можливість визначення локальних значень жорсткості в будь-якій точці характеристики пружини, проте потребує значних витрат і є економічно доцільним переважно за великих обсягів випробувань.

Методика експериментального дослідження.

Проаналізувавши методи визначення жорсткості пружини експериментальним шляхом для виконання експериментального дослідження було обрано третій метод.

Обладнання для проведення експериментального дослідження.

Для експериментального дослідження використали наступне обладнання: домкрат, тензодатчик, аналог динамометра ДОСМ-3-1.

Технічні характеристики тензодатчика:

- межі вимірів – від 1 кН до 10 кН (від 100 кг до 1 т);
- ціна найменшого поділу шкали, від найбільшої межі виміру
- не менше 0,2%;
- поріг чутливості, від максимальної межі виміру - більше 0,02%;
- значення різниці показань динамометра при навантаженні і розвантаженні при 50% навантаженні, від вимірюваного значення - не більше 0,8%;
- неповернення покажчика на нульову позначку при розвантаженні динамометра - не більше 0,5 поділки;
- температура довкілля – від -60 ° С до +60 ° С;
- відносна вологість - не більше 85%;
- габаритні розміри – 190 × 165 × 105 мм;
- маса – не більше 2 кг.

Порядок виконання експерименту.

Пружина 5 встановлюється на прес і синхронізується з лінійкою 2. За допомогою домкрата 1 усуваються зазори і на тензодатчику 3 виставляється значення «0».

Виконується тестове навантаження до 80-90% від максимального навантаження, визначаються покази тензодатчика. Пружина розвантажується. Пружина навантажується на 5-10% від максимального навантаження. При цьому усуваються зазори в елементах випробувального стенду для зменшення похибки вимірювання. Потім пружина навантажується з крок переміщення 5 мм на вимірювальній лінійці. При цьому записуються покази динамометра. При кожному навантаженні записуються значення переміщення вказівника і показники динамометра. Навантаження виконують повного стискування пружини, далі знімаються показники до повного розвантаження пружини.

Калібрування тензодатчика – це процес встановлення точної відповідності між вихідним електричним сигналом (зазвичай у мілівольтах) та прикладеним фізичним навантаженням (вагою).

Підготовка до стандартного калібрування: Прогрів: Увімкнена система (датчик + ваговий індикатор/контролер) на протязі 15–30 хвилин для стабілізації температурних показників. Далі виконана перевірка установки: датчик встановлений рівно, без перекосів, а на платформі немає сторонніх предметів.

Для процесу калібрування використовують метод двох точок:

1. Встановлення "Нуля" (Zero Calibration).
2. Калібрування вагою (Span Calibration): встановлення на платформі еталонної гирі (2 кг). Ввід на клавіатурі індикатора точне значення ваги цієї гирі. Очікування стабілізації та підтвердження значення ("Enter/Done").
3. Перевірка точності: лінійність: еталонну вагу знято, індикатор повернувся до нуля. Гістерезис: вимірювання повторно виконано з різними вагами – точність в однакова на всьому діапазоні.

У ході експериментального дослідження жорсткості пружини задньої підвіски автомобіля ЗАЗ Sens було зафіксовано значення переміщення (стискування) пружини та відповідні покази динамометра.

Під час обробки результатів виконано такі етапи:

- покази шкали індикатора динамометра, використовуючи дані, наведені на рис. 3, перераховано у значення прикладеної сили;
- на основі отриманих експериментальних даних визначено коефіцієнт жорсткості пружини.

За результатами дослідження встановлено мінімальне та максимальне значення коефіцієнта жорсткості. Для аналізу залежності жорсткості від величини деформації було обрано дві пружини: з

постійним діаметром дроту та зі змінним діаметром дроту [3-5].

Пружина з постійним діаметром прута (рис. 3) має наступні параметри: вага – 1,84 кг, діаметр 1 – 13 мм, зовнішній діаметр – 155 мм, довжина – 230 мм.

Пружина зі змінним діаметром прута (рис. 4) має наступні параметри: вага – 2,3 кг, діаметр 1,1 – 8,2 мм, діаметр 2,1 – 14,59 мм, діаметр 3,1 – 8,7 мм, зовнішній діаметр – 162 мм, довжина – 244 мм.



Рис. 2. Експериментальне дослідження пружини: 1 – домкрат, 2 – лінійка, 3 – тензодатчик, 4 – опорна площадка, 5 – пружина



Рис. 3. Пружина з постійним діаметром дроту



Рис. 4. Пружина зі змінним діаметром дроту

При дослідженнях отримані результати.

1. Дослідження залежності жорсткості пружини з постійним діаметром дроту від деформації (рис. 5, рис. 6).

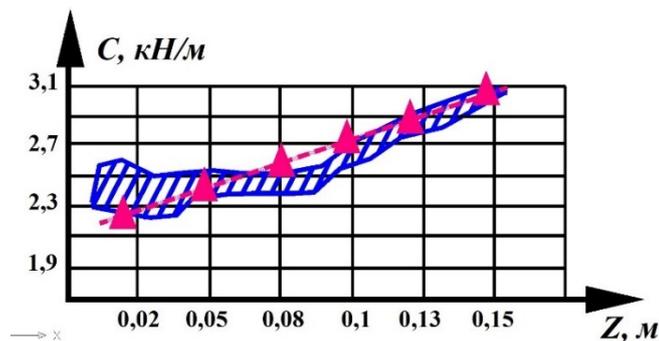


Рис. 5. Залежність жорсткості пружини з постійним діаметром дроту від деформації при навантаженні

Залежність жорсткості пружини при навантаженні

$$C_p = 44392 \cdot z + 22811.$$

Середньоквадратична похибка рівняння:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(C_p - \tilde{C}_p)^2}{n-2}} = 1093,91, \text{ Н/м.}$$

Відносна похибка складе:

$$\varepsilon = \frac{S_e}{C_p} * 100\% = 4,32\%.$$

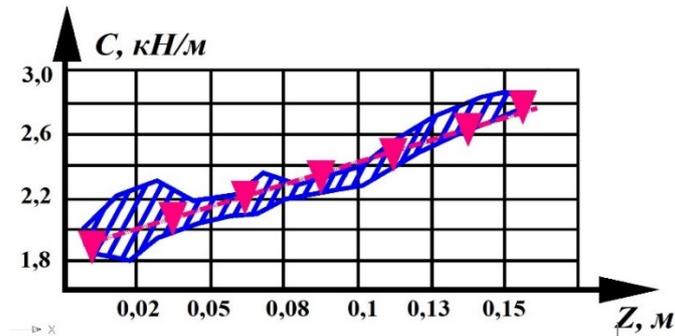


Рис. 6. Залежність жорсткості пружини з постійним діаметром дроту від деформації при розвантаженні

Залежність жорсткості пружини при вивільненні

$$C_p = 64987 \cdot z + 20211.$$

Визначимо середньо квадратичну похибку рівняння:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(C_p - \tilde{C}_p)^2}{n-2}} = 931,01, \text{ Н/м.}$$

Відносна похибка складе:

$$\varepsilon = \frac{S_e}{C_p} * 100\% = 3,9\%.$$

В результаті експерименту отримано:

- мінімальне значення коефіцієнту жорсткості $C_{p \min} = 19019,42 \text{ Н/м}$;
- максимальне значення коефіцієнту жорсткості $C_{p \max} = 30691 \text{ Н/м}$.

2. Дослідження залежності жорсткості пружини зі змінним діаметром прута від деформації (рис. 7, рис. 8).

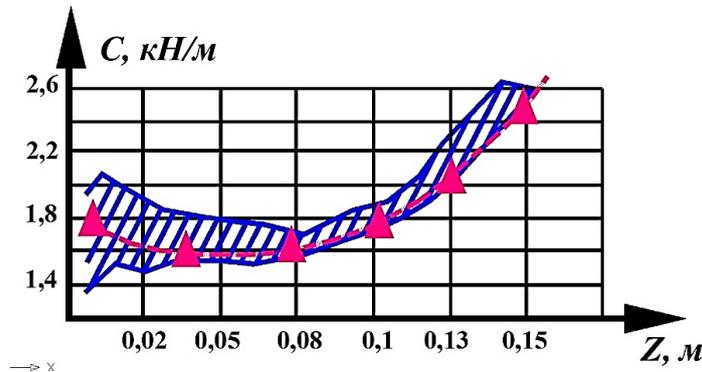


Рис. 7. Залежність жорсткості пружини зі змінним діаметром дроту від деформації при навантаженні

Залежність жорсткості пружини при навантаженні

$$C_p = 106 \cdot z^2 + 109971 \cdot z + 18992.$$

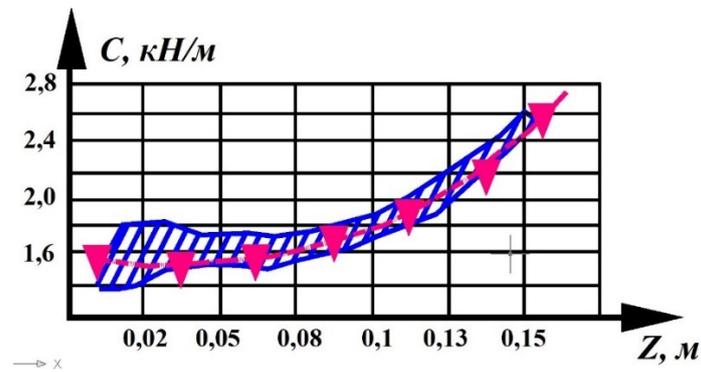


Рис. 8. Залежність жорсткості пружини зі змінним діаметром дроту від деформації при розвантаженні

Визначимо середньо квадратичну похибку рівняння:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(C_p - \bar{C}_p)^2}{n-2}} = 1045,1 \text{ , Н/м.}$$

Відносна похибка складе:

$$\varepsilon = \frac{S_e}{\bar{C}_p} * 100\% = 5,6\%.$$

Залежність жорсткості пружини при розвантаженні

$$C_p = 716912 \cdot z^2 + 48211 \cdot z + 15967.$$

Визначимо середньо квадратичну похибку рівняння:

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum(C_p - \bar{C}_p)^2}{n-2}} = 1531,33 \text{ , Н/м.}$$

Відносна похибка складе:

$$\varepsilon = \frac{S_e}{\bar{C}_p} * 100\% = 8,0\%.$$

В результаті експерименту отримано:

- мінімальне значення коефіцієнту жорсткості $C_p \min = 10911 \text{ Н/м}$;
- максимальне значення коефіцієнту жорсткості $C_p \max = 26569,8 \text{ Н/м}$.

Висновки

У роботі виконано експериментальне дослідження силових характеристик пружних елементів підвіски автомобіля з використанням стенду з тензометричною системою вимірювання навантаження. Реалізована методика забезпечує можливість визначення локальних значень коефіцієнта жорсткості в усьому робочому діапазоні деформацій, а також аналізу процесів навантаження і розвантаження.

Для пружини з постійним діаметром дроту встановлено, що її жорсткість у дослідженому діапазоні деформацій змінюється в межах $C_p \min = 10911 \text{ Н/м}$.

Отримані апроксимаційні залежності при навантаженні та розвантаженні характеризуються відносною похибкою 4,32% та 3,9% відповідно, що свідчить про достатню точність побудованих моделей. Виявлено наявність гістерезису, що проявляється у різниці характеристик при навантаженні й розвантаженні.

Для пружини зі змінним діаметром дроту встановлено суттєво виражений нелінійний характер зміни жорсткості від деформації. Значення коефіцієнта жорсткості змінюється в межах $C_p \max = 26569,8 \text{ Н/м}$.

Отримані квадратичні залежності адекватно описують експериментальні дані з відносною похибкою 5,6% (при навантаженні) та 8,2% (при розвантаженні).

Порівняльний аналіз показав, що пружина з постійним діаметром дроту має більш стабільну характеристику жорсткості та менший рівень нелінійності, тоді як пружина зі змінним діаметром забезпечує прогресивну зміну жорсткості, що може бути доцільним для покращення плавності ходу при малих навантаженнях і підвищення несучої здатності при великих деформаціях.

Запропонована методика експериментального визначення жорсткості дозволяє:

- оцінювати відповідність пружин нормативним характеристикам;

- визначати мінімальні та максимальні значення коефіцієнта жорсткості;
- аналізувати гістерезисні явища та залишкові деформації;
- виконувати підбір пар пружин з близькими характеристиками для встановлення на одну вісь автомобіля.

Отримані результати можуть бути використані під час діагностики технічного стану пружин підвіски, оптимізації конструктивних параметрів нових виробів, а також при налаштуванні підвіски транспортних засобів, зокрема в умовах експлуатації, сервісного обслуговування та спортивного застосування.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення впливу циклічних навантажень, температурних факторів та втомних процесів на зміну силових характеристик пружних елементів підвіски.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Конохов В.І., Хавін В.Л., Автономова Л.В. Розрахунки стержнів при крученні: навчально-методичний посіб. з розділу курсу «Опір матеріалів» для студентів машинобудівних спеціальностей. Х.: НТУ «ХПІ», 2011. 76 с.
- [2] Бойко В. С., Кириченко С. А. Пружинні сталі та їх термічне оброблення: сучасні підходи. *Металознавство та термічне оброблення металів*. 2020. № 3. С. 18-25.
- [3] ДСТУ 8429:2015. Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі. Технічні умови. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2016.
- [4] ДСТУ EN 13906-1:2022. Циліндричні спіральні пружини з круглого дроту та прутка. Розрахунок і проектування. Частина 1. Пружини стискання. Київ: ДП УкрНДНЦ, 2022.
- [5] ДСТУ ISO 8458-2:2007. Дріт сталевий для механічних пружин. Частина 2. Київ: Держспоживстандарт України, 2009.

Пелех Олексій Романович – аспірант, <https://orcid.org/0009-0007-8410-9431>, e-mail: oleksii.r.pelekh@lpnu.ua
Зінко Роман Володимирович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри проектування машин та автомобільного інжинірингу, <https://orcid.org/0000-0002-3275-8188>, e-mail: rzinko@gmail.com

Національний університет «Львівська політехніка» м. Львів

Поляков Андрій Павлович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, <https://orcid.org/0000-0002-0413-6365>, e-mail: poliakovap61@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Скварок Юрій Юліанович – канд. техн. наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи та інформатизації, <https://orcid.org/0009-0007-7204-0588>, e-mail: y.skvarok@dspu.edu.ua

Дрогобицький державний педагогічний університет ім. І. Франка, м. Дрогобич

Бадейнов Олександр Михайлович – д-р філософії, судовий експерт, <https://orcid.org/0009-0005-4836-9514>, e-mail: badeynov@gmail.com

Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз, м. Львів

O. Pelekh¹
R. Zinko¹
A. Polyakov²
Yu. Skvarok³
O. Badeynov⁴

Experimental study of elastic elements of car suspension

The smoothness of the ride, handling, directional stability and safety of the vehicle are determined by the parameters of the vehicle's suspension. The vehicle's dynamic performance, comfort level and service life of the chassis elements are influenced by the compliance of the force characteristics of the elastic suspension elements with the calculated parameters.

The article presents the results of an experimental study of the parameters of the elastic elements of the car suspension and the determination of the dependence of the stiffness coefficient on the magnitude of deformation. The theoretical and experimental methods for determining the stiffness of coil springs are analyzed and the choice of a bench method using a strain gauge load sensor is justified. A method for conducting tests with step-by-step loading and unloading of the spring with fixation of the displacement and applied force is developed.

Two rear suspension springs were experimentally investigated - with a constant and a variable wire diameter. For each sample, analytical dependences of stiffness on deformation during loading and unloading were obtained, and the root mean square and relative approximation errors were determined. It was established that a spring with a constant wire diameter is characterized by a more stable (quasi-linear) change in stiffness, while a spring with a variable diameter has a pronounced nonlinear (progressive) characteristic. The presence of hysteresis phenomena was revealed, which cause the difference in force characteristics during loading and unloading.

The article presents the results of an experimental study of the parameters of the force characteristics of the elastic elements of the car suspension using a stand with a strain gauge system for measuring the load. The determination of local values of the stiffness coefficient in the entire operating range of spring deformations, as well as the analysis of the loading and unloading processes is provided by the proposed method, determine the minimum and maximum values of the stiffness coefficient, analyze hysteresis phenomena and residual deformations, and select pairs of springs with similar characteristics for installation on one axle of the vehicle

The results obtained can be used to diagnose the technical condition of springs, select pairs of elements for one axle, optimize design parameters, and adjust vehicle suspension characteristics.

Keywords: car suspension; coil spring; stiffness coefficient; experimental studies; strain gauge; nonlinear characteristic; hysteresis; deformation; force characteristic.

Pelekh Oleksii – postgraduate student, <https://orcid.org/0009-0007-8410-9431>, e-mail: oleksii.r.pelekh@lpnu.ua

Zinko Roman – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Machine Design and Automotive Engineering, <https://orcid.org/0000-0002-3275-8188>, e-mail: rzinko@gmail.com

Polyakov Andrii – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automobile and Transport Management, <https://orcid.org/0000-0002-0413-6365>, e-mail: poliakovap61@gmail.com

Skvarok Yury – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Work and Informatization, <https://orcid.org/0009-0007-7204-0588>, e-mail: y.skvarok@dspu.edu.ua

Badeynov Oleksandr – PhD, forensic expert, <https://orcid.org/0009-0005-4836-9514>, e-mail: badeynov@gmail.com