

## Визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних та напівпричіпних машин із застосуванням аналітичного моделювання

У статті описано розроблений авторами спосіб визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних машин з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпних машин із застосуванням аналітичного моделювання та результати його апробації.

**Ключові слова:** колісні машини, випробування, поперечна статична стійкість, спосіб аналітичного моделювання, методика, апробація.

**Стан питання і суть проблеми.** Одним з важливих факторів, що забезпечує безпечність роботи механізаторів, є стійкість самохідних сільгоспмашин, енергетичних засобів та мобільних агрегатів. Визначення граничного кута поперечної статичної стійкості мобільної сільгосптехніки є обов'язковою процедурою під час проведення більшості видів випробувань за стандартизованими методами [1, 2], має виконуватись на спеціальному стендовому обладнанні.

Стенд СУ-40 виробництва ЕП КубНВІТіМ та інші, що діють за аналогічним принципом, мають вантажну платформу з робочою площиною, яка монтується на фундаменті і може змінювати кут нахилу до горизонтальної площини, повертаючись навколо своєї горизонтальної осі. Машина, що випробовується, встановлюється на робочій площині платформи таким чином, щоб її поздовжня вісь була паралельною осі повороту платформи. Нахил платформи збільшують плавно до тих пір, поки будь-яке з коліс або гусениці не "відірвуться" від платформи (рис. 1). У цей момент за допомогою кутоміра вимірюється кут нахилу робочої площини платформи до горизонтальної площини, який є граничним кутом поперечної статичної стійкості машини, що випробується.

Стенди, як засоби прямого вимірювання, забезпе-

чують найвищу точність визначення поперечної статичної стійкості машин, але в практиці випробувань трапляється багато випадків, коли машина не може бути розміщена на стенді через свої великі розміри. Другою проблемою є те, що стенди – це непересувне устаткування, через що не можуть бути використані поза територією випробувальних центрів, де в багатьох випадках проводяться випробування машин.

У Південно-Українській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого розроблені та впроваджені в практику випробувань три способи визначення граничного кута поперечної статичної стійкості мобільних сільськогосподарських машин без використання спеціального стендового обладнання, які передбачають три види моделювання: фізичне, аналітичне та графічне. Щодо способу фізичного моделювання, то в журналі [3] була відповідна публікація. Спосіб визначення граничного кута поперечної статичної стійкості аналітичним моделюванням розроблений для чотирьох типів машин за конструкційними ознаками їх ходових частин, які об'єднані у дві групи за ідентичністю розрахункових формул. Перша група – це машини з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпні машини, друга група – це машини з небалансірною підвіскою коліс ходової частини та триколісні машини.

У цій статті йдеться про першу групу машин (продовження опису другої групи машин буде в одному з наступних номерів журналу).

**Мета дослідження** – розробити способи визначення граничного кута поперечної статичної стійкості мобільних сільгоспмашин без використання спеціального стендового обладнання.

**Об'єкт дослідження** – спосіб визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних машин з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпних машин аналітичним моделюванням.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Теоретичною основою розробленого способу визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних машин є такі положення:

1) втрата машиною поперечної статичної стійкості, тобто перехід із стійкого в нестійке положення рівноваги, відбувається в той момент, коли лінія дії сили



Рис. 1 – Визначення граничного кута поперечної статичної стійкості обприскувача ОПШ-3000 "Орлан-24" стандартизованим методом на стенді СУ-40

ваги машини, яка за визначенням проходить крізь центр ваги машини, перетинає її опорний контур;

2. Опорний контур машини з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини наближений до форми трикутника з вершинами у точках  $K_1$  і  $K_2$ , що розташовані посередині зовнішніх сторін плям контакту небалансірно підвішених коліс з площиною опори машини, а також з вершиною у точці  $B$ , яка розташована в центрі шарніра осі балансірно підвішеного моста (рис. 2).

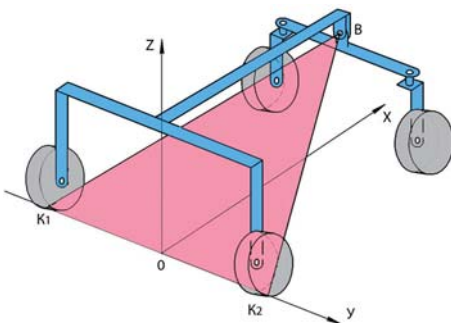


Рис. 2 – Схема розташування опорного контуру машини з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та просторової прямокутної системи координат відносно машини

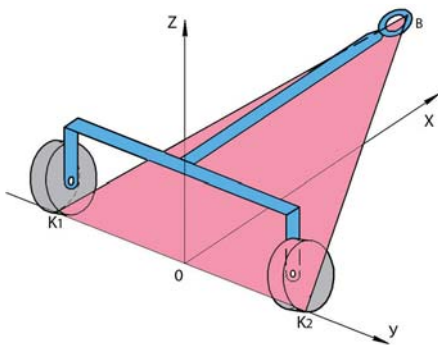


Рис. 3 – Схема розташування опорного контуру напівпричіпної машини та просторової прямокутної системи координат відносно машини

лініями дії сили ваги машини відносно горизонтального положення машини (лінія 1) і відносно нахилоного положення машини до стану нестійкої рівноваги (лінія 2), як кути з взаємно перпендикулярними сторонами ( $\alpha = \alpha_1$ ) (рис. 4).

Таким чином, задача щодо визначення граничного кута поперечної статичної стійкості машини зводиться до:

- розрахунку кутів між лінією дії сили ваги машини відносно горизонтального положення машини і лініями дії сили ваги машини відносно положень машини у стані нестійкої рівноваги в результаті її нахилу на лівий та правий боки;

- вибору найменшого з розрахованих кутів як оцінного значення.

Визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісної машини з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпної машини способом аналітичного моделювання складається з трьох етапів.

На першому етапі з горизонтально розташованою

Аналогічний за формою опорний контур напівпричіпної машини з вершинами  $K_1$  і  $K_2$ , що розташовані посередині зовнішніх сторін плям контакту коліс з площиною опори машини, а також у точці  $B$ , яка розташована в центрі шарнірного зчеплення напівпричіпної машини з тягачем (рис. 3);

3) граничний кут поперечної статичної стійкості колісної машини ( $\alpha$ ) в загальному випадку, тобто незалежно від різновиду її ходової системи, дорівнює куту ( $\alpha_1$ ) між

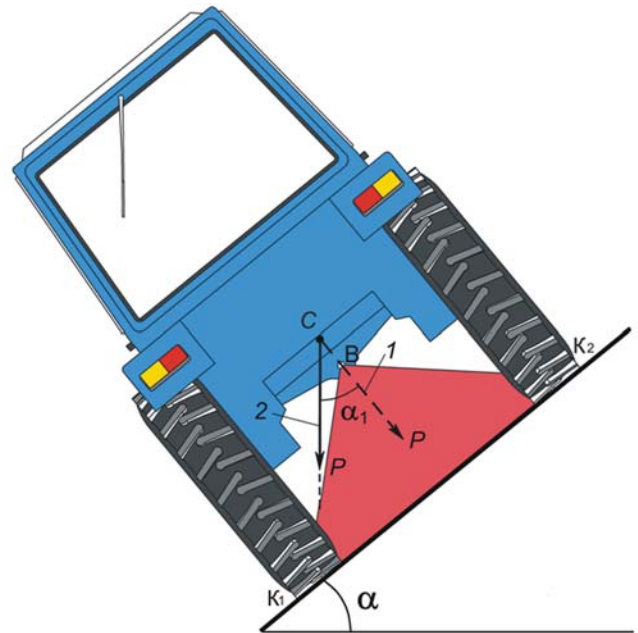


Рис. 4 – Розташування лінії дії сили ваги машини відносно горизонтального положення машини і відносно нахилоного положення машини до стану нестійкої рівноваги

машиною зв'язується просторова прямокутна система координат  $OXYZ$  (рис. 2, 3). Вісь абсцис ( $OX$ ) системи координат співпадає з проекцією на площину опори машини вертикальної поздовжньої площини, яка проходить посередині між колесами з небалансірною підвіскою, вісь ординат ( $OY$ ) співпадає з проекцією на площину опори машини вертикальної поперечної площини, яка проходить крізь осі коліс з небалансірною підвіскою, а вісь аплікату ( $OZ$ ) – перпендикулярна до зазначених координатних осей і перетинає початок координат ( $O$ ).

В цій системі координат вимірюються координати вершин опорного контуру горизонтально розташованої машини  $Y_{K1}$ ,  $Y_{K2}$ ,  $X_B$ ,  $Y_B$ ,  $Z_B$  (рис. 2, 3) та згідно зі стандартизованою методикою [4, 5] визначаються координати центру ваги машини  $X_C$ ,  $Y_C$ ,  $Z_C$ .

На другому етапі, з метою урахування поперечного зсуву (поперечної деформації) пневматичних колісних шин в момент втрати машиною поперечної статичної стійкості на схилі, проводять коригування поперечних координат точок  $K_1$  і  $K_2$ . Це пояснюється тим, що відносно зв'язаної з машиною системи координат, поперечні координати точок  $K_1$  і  $K_2$  у місці контакту небалансірно підвішених коліс з площиною опори нахилої на бік машини ( $Y'_{K1}$  і  $Y'_{K2}$ ) будуть меншими за абсолютною величиною поперечних координат цих точок горизонтально розташованої машини ( $Y_{K1}$ ,  $Y_{K2}$ ) на величину поперечного зсуву (поперечної деформації) шин.

При значеннях кута поперечного нахилу машини, близьких до мінімально допустимого значення граничного кута поперечної статичної стійкості 25-30° [6, 7, 8, 9], поперечний зсув (поперечна деформація) шин в середньому буде дорівнювати нормальному прогину шин [10]. За визначенням нормальний прогин шин ( $h_0$ ) розраховується як різниця вільного ( $r_0$ ) і статичного ( $r_c$ ) радіусів колеса:



$$h_o = r_o - r_c. \quad (1)$$

Отже, в загальному випадку під час втрати машиною поперечної статичної стійкості, кориговані поперечні координати  $Y'_{K1}$  і  $Y'_{K2}$  можна визначити з несуттєвою похибкою, як поперечні координати середніх точок зовнішніх сторін плям контакту небалансирно підвішених коліс з опорною поверхнею при горизонтальному положенні машини, зменшені за абсолютною величиною на величину нормального прогину шин.

На третьому етапі розраховуються граничні кути поперечної статичної стійкості машини в результаті її нахилу на лівий і правий боки та вибирається найменший кут як оцінне значення.

Граничні кути поперечної статичної стійкості колісної машини з балансирною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпної машини в результаті її нахилу на лівий і правий боки – розраховують за узагальненою формулою, яка виведена методами аналітичної геометрії у ході розроблення способу аналітичного моделювання:

$$\alpha_{1(2)} = \arccos \frac{X_B Z_C - X_C Z_B}{X_B \sqrt{\left[ Y_C - \frac{X_C}{X_B} (Y_B - Y'_{K1(K2)}) - Y'_{K1(K2)} \right]^2 + \left( Z_C - \frac{X_C Z_B}{X_B} \right)^2}},$$

де  $\alpha_1$  – кут поперечної статичної стійкості машини при її нахилі на лівий бік, град;  $\alpha_2$  – кут поперечної статичної стійкості машини при її нахилі на правий бік, град;  $X_B$ ,  $Y_B$ ,  $Z_B$  – відповідно поздовжня, поперечна і вертикальна координати центра шарніра балансирно-підвішеного моста ходової частини або центра шарніра зчіпного пристрою, мм;  $X_C$ ,  $Y_C$ ,  $Z_C$  – відповідно поздовжня, поперечна і вертикальна координати центра ваги машини, мм;  $Y'_{K1}$  – коригована по деформації шини поперечна координата точки  $K_1$  у розрахунку кута поперечної статичної стійкості машини при її нахилі на лівий бік, мм;  $Y'_{K2}$  – коригована по деформації шини поперечна координата точки  $K_2$  у розрахунку кута поперечної статичної стійкості машини при її нахилі на правий бік, мм.

Апробація способу проводилась на двох різнотипних машинах за конструкцією їх ходових частин. Це трактор МТЗ-80 (виробник: “Мінський тракторний завод” м. Мінськ), який має схему ходової частини машини з балансирною підвіскою керованих коліс, та сівалка універсальна пневматична УПС-8 (виробник: ПАТ “Червона зірка” м. Кіровоград), яка в транспортному положенні має схему ходової частини напівпричіпної машини.

Процес апробації проводився шляхом визначення граничного кута поперечної статичної стійкості трактора МТЗ-80 і сівалки УПС-8 розробленим способом із застосуванням аналітичного моделювання (рис. 5) та стандартизованим способом прямого вимірювання цього показника з використанням стенда СУ-40 (рис. 6) і подальшим співставленням розбіжностей між значеннями граничного кута поперечної статичної стійкості машин, отриманих порівнюваними способами, з допустимими похибками вимірювань [1, 2]. Результати апробації наведені в таблиці.



Рис. 5 – Визначення координат центра ваги трактора МТЗ-80 в процесі апробації способу визначення граничного кута поперечної статичної стійкості з використанням аналітичного моделювання



Рис. 6 – Визначення граничного кута поперечної статичної стійкості трактора МТЗ-80 на стенді СУ-40 в процесі апробації способу визначення граничного кута поперечної статичної стійкості із застосуванням аналітичного моделювання

**Результати апробації способу визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних машин з балансирною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпних машин з використанням аналітичного моделювання**

Найменування і марка машини	Граничний кут, поперечної статичної стійкості машини, град		Розбіжність між значеннями граничного кута поперечної статичної стійкості машини, що визначені порівнюваними способами, град	Допустима похибка вимірювань, град
	визначений способом з застосуванням аналітичного моделювання	визначений стандартизованим способом з застосуванням стенда СУ-40		
Трактор МТЗ-80	33,74	33,0	0,74	±1,0
Сівалка універсальна пневматична УПС-8	39,71	40,0	0,29	±1,0

З аналізу отриманих даних видно, що значення граничного кута поперечної статичної стійкості кожної з досліджених машин, які визначені способом із застосуванням аналітичного моделювання, відрізняються від значень цього показника за результатами прямого вимірювання на стенді СУ-40 в межах допустимої похибки вимірювань, тобто не більше 1 град. Таким чином, спосіб визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних машин з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпних машин з використанням аналітичного моделювання придатний для випробувань і досліджень даного типу машин.

Апробація також підтвердила, що використання вищезазначеного способу забезпечує можливість визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних машин з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпних машин:

- незалежно від їх габаритних розмірів;
- на території підприємств та організацій, які не оснащені спеціальним стендом;
- в межах допустимої похибки вимірювань;
- з економією витрат енергії, матеріалів, робочого часу, отже – з економією грошових витрат;
- зі зниженням рівня небезпеки процесу випробувань.

Спосіб визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних машин з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпних машин із застосуванням аналітичного моделювання покладений в основу розробленої в Південно-Українській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого відповідної методики [11], за допомогою якої протягом останніх 4-х років фахівцями філії випробувано понад 900 машин.

#### Висновки.

1. Розроблено спосіб визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних машини з балансірною підвіскою одного з мостів ходової частини та напівпричіпних машин із застосуванням аналітичного моделювання та відповідну методику.

2. Апробація способу та заснованої на ньому методики дають підставу визнати їх придатними для випробувань мобільної сільськогосподарської техніки.

3. Південно-Українській філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого має 4-річний досвід визначення граничного кута поперечної статичної стійкості мобільних сільгоспмашин аналітичним моделюванням у випадках, коли відсутня можливість використання спеціального стендового обладнання.

#### Список літератури

1. ГОСТ 12.2.002-91. ССБТ. Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности. – Введ. 1992-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 60 с.
2. СОУ 74.3-37-133:2004. Випробування сільськогосподарської техніки. Трактори, машини і обладнання для рослинництва, тваринництва, кормовиробництва та стаціонарні сільськогосподарські. Методи оцінки безпечності та ергономічності. – Чин. 2006-08-01. – К.: Мінагрополітики України, 2004. – 80 с.
3. Лілевман, І., Визначення граничного кута поперечної статичної стійкості мобільних сільськогоспо-

дарських машин методом фізичного моделювання /І. Й. Лілевман, О. Й. Лілевман, З. М. Терещук // Техніка і технології АПК. – 2010. – № 5. – С. 37-39.

4. ДСТУ ISO 789-6:2005. Сільськогосподарські трактори. Методики випробування. Частина 6. Центр ваги (ISO 789/6-1982, IDT). – Чин. 2006-07-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 10 с.

5. ГОСТ 27248-87 (ИСО 5005-77). Машины землеройные. Метод определения положения центра тяжести. – Введ. 1988-01-01.-М.: Изд-во стандартов, 1987.– 9 с.

6. ДСТУ 2189-93. ССБП. Машины сільськогосподарські навісні та причіпні. Загальні вимоги безпеки.- Чин. 1994-01-01. – К.:Держстандарт України, 1993.–28 с.

7. ДСТУ 3158-95. Засоби малої механізації для сільськогосподарського виробництва. Загальні вимоги безпеки. – Чин. 1996-07-01.- К.: Держстандарт України, 1995. – 31 с.

8. ГОСТ 12.2.019-86. ССБТ. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности. – Введ. 1987-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 25 с.

9. ГОСТ 10000-75. Прицепы и полуприцепы тракторные. Общие технические требования. – Введ. 1977-01-01 – М.: Изд-во стандартов, 1988.- 7с.

10. Работа автомобильной шины /В. И. Кнороз [и др.]; под общ. ред. В. И. Кнороза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.

11. М 5.4-04:2009 Методика визначення граничного кута поперечної статичної стійкості мобільних сільгоспмашин з балансірною підвіскою керованих коліс та напівпричіпних машин без використання спеціального стендового обладнання. – Введ. 2009-12-16. – Херсон: Південно-Українська філія УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого. 2009. – 19 с.

**Аннотация.** В статье описан разработанный авторами способ определения предельного угла поперечной статической устойчивости колесных машин с балансирной подвеской одного из мостов ходовой части и полуприцепных машин с использованием аналитического моделирования и результаты его апробации.

**Summare.** The article describes a method developed by the authors to determine the maximum angle of transverse static stability of wheeled vehicles with centerpoint suspension of one of the bridges of the chassis and semi-governmental machines using analytical modeling and the results of its approbation.

Стаття надійшла до редакції 29 жовтня 2013 р.