Механіка, машинознавство та електропостачання

УДК 629.014

DOI: 10.30748/zhups.2021.70.13

М.А. Подригало¹, О.Г. Закапко²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

²Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛІЗУЮЧИХ МОМЕНТІВ НА ПЕРЕДНЬОМУ ПОВОРОТНОМУ МОСТУ ТРАКТОРНОГО САМОХІДНОГО ШАСІ

В статті досліджуються стабілізуючі моменти на передньому поворотному мосту тракторного самохідного шасі. Метою статті є підвищення керованості і стійкості автомобілів з переднім поворотним мостом за рахунок збільшення стабілізуючих моментів. Представлені результати визначення стабілізуючих моментів, які діють на передній поворотний міст при русі по прямій і на повороті. Запропоновано додатково встановлювати вал приводу повороту переднього моста під кутом до вертикалі в поздовжній площині симетрії самохідного шасі. Визначені аналітичні залежності стабілізуючих моментів від лінійної швидкості самохідного шасі, кута та кутової швидкості повороту моста, а також від геометричних та вагових параметрів машини.

Ключові слова: тракторне самохідне шасі, поворотний передній міст, стабілізуючий момент, поздовжній нахил переднього валу.

Вступ

Постановка проблеми. Застосування поворотного переднього моста на універсально-просапному тракторному самохідному шасі дозволяє забезпечити механізовану навіску машин і знарядь в міжосьову зону, покращити маневреність та керованість, особливо при зміні колії передніх коліс в процесі експлуатації.

Застосування переднього поворотного моста взамін поворотних передніх направляючих коліс призводить до зниження стабілізуючих положення переднього моста моментів. Це зумовлено відсутністю на колесах поворотних кулаків і шкворнів, які мають нахили вістей в поздовжній та поперечній площинах.

В статті представлено результати визначення стабілізуючих моментів, які діють на передній поворотний міст при русі по прямій і на повороті. Запропоновано додатково встановлювати вал приводу повороту переднього моста під кутом до вертикалі в поздовжній площині симетрії самохідного шасі. Визначені аналітичні залежності стабілізуючих моментів від лінійної швидкості самохідного шасі, кута та кутової швидкості повороту моста, а також від геометричних та вагових параметрів машини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вперше задачу про стійкість руху керованих (направляючих) коліс автомобілів сформулював К.С. Ко-

лесніков в своїй роботі [1]:

“При прямолінійному і рівномірному руху автомобіля керовані колеса зі сторони дороги отримали будь-які малі збурення, від чого виникли коливання коліс навколо шворнів і, пов’язані з ними кутові коливання осі в вертикальній площині; необхідно визначити, яким співвідношенням повинні задовольняти параметри системи і швидкість автомобіля, щоб коливання, які виникли були затухаючими і колеса прагнули завжди повернутися до прямолінійного руху”.

Запропоноване в роботі [1] формулювання відноситься до задачі забезпечення курсової стійкості, тобто стійкості прямолінійного руху автомобіля. При забезпеченні, як курсової стійкості, так і стійкості траєкторної, стабілізуючі моменти, які виникають на направляючих колесах, повинні забезпечувати стійкість руху автомобілів і тракторів по прямій і на повороті при впливі різноманітних збуджуючих факторів.

Аналіз коливальних процесів керованих коліс детально розглянутий також в роботі [2].

В роботі [3] відмічається, що стабілізація керованих коліс автомобіля характеризується швидкістю повернення керованих коліс із поворотно-повернутого положення в пряме і спрямоване на полегшення роботи водія.

Стабілізація керованих коліс автомобіля достатньо повно досліджено в роботах різних відомих

авторів. В роботі [4] визначений і досліджений стабілізуючий момент шини керованого (направляючого) колеса автомобіля. Однак в указаних роботах не розглянуті стабілізуючі моменти на поворотній (направляючій) осі. Модель руху автомобіля при малих коливань відхилення керованих коліс від нейтрального положення розглянута в роботі [5]. В цій моделі фактично розглядався передній поворотний міст, але не враховувалися стабілізуючі моменти. Також не розглядався передній балансірно підвішений міст. Вплив різноманітних факторів на стійкість руху колісних машин і направляючих коліс розглянуто в роботах [2; 5; 8; 10–14].

Таким чином, при аналізі останніх досліджень і публікацій встановлено, що стабілізуючі моменти, які діють на передній балансірний поворотний міст,

не розглянуті.

Метою статті є підвищення керованості і стійкості автомобілів з переднім поворотним мостом за рахунок збільшення стабілізуючих моментів.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити стабілізуючі моменти, які діють на передній поворотний міст;
- оцінити можливість збільшення стабілізуючого моменту на передній осі використовуючи створення поздовжнього нахилу вертикального валу.

В роботі [6] визначено момент опору переднього моста тракторного самохідного шасі, який має балансірний підвіс:

$$M_{comp} = \frac{B}{2} f (R_{z1} - R_{z2}) = f h_0 \left\{ m_T \sec \alpha \left[\frac{b^2 + i_z^2 + f h b}{L^2} \tan \alpha \frac{dV_x}{dt} + V_{x1}^2 \tan \alpha \frac{B + f h}{L^2} + V_{x1} \frac{b^2 + i_z^2 + f h b}{L^2 \cos^2 \alpha} \frac{d\alpha}{dt} \right] + f R_{z1} \tan \alpha \right\}, \quad (1)$$

де B – колія передньої осі трактора;

R_{z1} , R_{z2} – нормальна реакція дороги на внутрішньому (по відношенню до центру повороту машини) і зовнішньому колесах;

f – коефіцієнт опору коченню;

α – кут повороту переднього мосту;

b – відстань від задньої осі трактора до проекції центра маси на горизонтальну площину;

i_z – радіус інерції машини відносно вертикальної осі;

h – висота центра маси трактора відносно опірної поверхні;

L – поздовжня колісна база;

V_{x1} , $\frac{dV_x}{dt}$ – лінійні швидкість і прискорення

вздовж поздовжньої осі машини;

R_{z1} – сумарна нормальна реакція дороги на передніх колесах трактора.

При цьому R_{z1} розраховується за виразом (2):

$$R_{z1} = R'_{z1} + R''_{z2}, \quad (2)$$

де h_0 – вертикальна координатна точка підвісу передньої осі.

Рівняння (1) приводимо до вигляду (3):

$$M_{comp} = f h_0 \left\{ m_T \sec \alpha \left[\frac{b^2 + f h b}{L^2} \left(\frac{dU_{x1}}{df} \tan \alpha + \sec^2 \alpha \frac{dt}{df} V_{x1} \right) + V_{x1}^2 \frac{b + f h}{L^2} \tan \alpha \right] + f R_{z1} \tan \alpha \right\}. \quad (3)$$

При усталеному русі на повороті $\frac{d\alpha}{dt} = 0$ і $\frac{dU_{x1}}{df} = 0$. Рівняння (3) в цьому випадку прийме вигляд (4):

$$M_{comp} = f h_0 \left(m_T \sec \alpha \tan \alpha \frac{b + f h}{L} V_{x1}^2 + f R_{z1} \tan \alpha \right). \quad (4)$$

Зважаючи на те, що

$$R_{z1} = m_T g \frac{b}{L}, \quad (5)$$

приводимо (4) до вигляду (6):

$$M_{comp} = \frac{f^2 h_0 b m_T g}{L} \left(1 + \frac{V_{x1}^2}{g} \frac{1}{L} \frac{b}{f} \sec \alpha \right) \tan \alpha, \quad (6)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Із рівняння (6) видно, що при $\alpha = 0$ момент опору M_{comp} також дорівнює нулю. З ростом кута повороту α переднього мосту здійснюється збільшення моменту опору M_{comp} . Максимальна величина останнього настає при максимальному куті $\alpha = \alpha_{\max}$.

Вираз (6) в цьому випадку прийме вигляд (7):

$$\begin{aligned} (M_{comp})_{\max} = \\ = \frac{f^2 h_0 b m_T g}{L} \left(1 + \frac{V_{x1}^2}{g} \frac{1}{f} + \frac{h}{b} \sec \alpha_{\max} \right) \tan \alpha_{\max}. \end{aligned} \quad (7)$$

Момент опору повороту, хоча і є редуторним, створює умови для повернення переднього поворотного мосту в нейтральне положення.

Активною силою, яка викликає поворот мосту в нейтральне положення, являється штовхаюча сила від ведучих коліс трактора прикладена в вертикальному шарнірі.

При прямолінійному сталому русі трактора $\frac{dV_x}{dt} = 0$, $\alpha = 0$ і вираз (3) прийме наступний вигляд

$$M_{comp} = f h_0 m_T \frac{b^2 + i_z^2 + f h b}{L^2} V_{x1} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (8)$$

З виразу (8) видно, що при прямолінійному сталому русі трактора момент опору повороту про-

порційний кутовій швидкості повороту переднього мосту $\frac{d\alpha}{dt}$ та лінійній швидкості V_{x1} трактора.

Диференціюючи рівняння (8) знаходимо зв'язок між кутовим прискоренням переднього поворотного мосту і швидкістю зростання моменту опору повороту

$$\frac{dM_{comp}}{dt} = f h_0 m_T \frac{b^2 + i_z^2 + f h b}{L^2} V_{x1} \frac{d^2 \alpha}{dt^2}. \quad (9)$$

Оскільки у випадку, який розглядається, момент опору повороту є моментом стабілізуючим, то вираз (9) представимо в наступному вигляді

$$\begin{aligned} \frac{dM_{cmaб}}{dt} = \\ = - \frac{dM_{comp}}{dt} = - f h_0 m_T \frac{b^2 + i_z^2 + f h b}{L^2} V_{x1} \frac{d^2 \alpha}{dt^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

В загальному випадку несталого руху машини на повороті величину стабілізуючого моменту $M_{cmaб}$ можна записати у вигляді (11):

$$M_{cmaб} = -M_{comp} = - \frac{f^2 h_0 m_T}{L} \sec \alpha \tan \alpha \left[\frac{b^2 + i_z^2 + f h b}{L} \left(\frac{dV_{x1}}{dt} + \frac{2}{\sin 2\alpha} \frac{d\alpha}{dt} V_{x1} \right) + V_{x1}^2 \frac{b + f h}{L} + f g b \right]. \quad (11)$$

Аналізуючи вираз (11) можна зробити висновок про те, що на величину $M_{cmaб}$ чинять вплив параметри α , $\frac{d\alpha}{dt}$, V_{x1} , V_{x1}^2 та $\frac{dV_{x1}}{dt}$. Для скорочення кількості факторів, які впливають на стабілізуючий момент, використовуємо теорію подібності (теорію узагальненої змінної) [7].

Враховуючи співвідношення між лінійною швидкістю автомобіля V_{x1} , лінійним прискоренням

$\frac{dV_{x1}}{dt}$ і швидкістю повороту направляючих коліс $\frac{d\alpha}{dt}$, які отримані в роботі [8]:

$$\frac{dV_z}{dt} = \frac{\frac{dV_{x1}}{dt} \tan \alpha + V_{x1} \sec^2 \alpha \frac{d\alpha}{dt}}{L}, \quad (12)$$

перетворюємо вираз (11) до вигляду (13):

$$M_{cmaб} = - \frac{f h_0 m_T \sec \alpha}{L} \left[(b^2 + i_z^2 + f h b) \frac{dW_z}{dt} + V_{x1}^2 \frac{b + f h}{L} \tan \alpha + f g b \cdot t g \alpha \right], \quad (13)$$

де W_z та $\frac{dW_z}{dt}$ – кутові швидкість і прискорення трактора в площині дороги.

З виразу (13) видно, що на величину стабілізуючого моменту $M_{cmaб}$ впливають наступні фактори:

- кут повороту переднього мосту α ;
- кутове прискорення трактора $\frac{dW_z}{dt}$ в площині дороги;

- квадрат лінійної швидкості машини V_{x1}^2 ;
 - коефіцієнт опору кочення направляючих коліс.
- Вираз (13) можна представити у вигляді (14):

$$M_{cmaб} = W_1(\alpha) \frac{dV_z}{dt} + W_2(\alpha) V_{x1}^2 + W_3(\alpha) f^2, \quad (14)$$

де $W_1(\alpha)$ передаточна функція від кутового прискорення трактора в площині дороги до стабілізуючого моменту та дорівнює:

$$W_1(\alpha) = f h_0 m_T \sec \alpha \frac{b^2 + i_z^2 + f h b}{L}, \quad (15)$$

де $W_2(\alpha)$ – передаточна функція від квадрата лінійної швидкості трактора V_{x1}^2 до стабілізуючого моменту та дорівнює

$$W_2(\alpha) = \frac{f h_0 m_T (b + f h)}{L^2} \sec \alpha \tan \alpha, \quad (16)$$

де $W_3(\alpha)$ – передаточна функція від квадрата коефіцієнту опору f^2 коченню передніх коліс до ста-

білізуючого моменту та дорівнює

$$W_3(\alpha) = \frac{h_0 m_T g b}{L} \tan \alpha \sec \alpha. \quad (17)$$

Виходячи з отриманих результатів стабілізуючий момент можливо представити у вигляді суми компонент:

$$M_{\text{стаб}} = M_{\text{стаб1}} + M_{\text{стаб2}} + M_{\text{стаб3}}, \quad (18)$$

де $M_{\text{стаб1}}, M_{\text{стаб2}}, M_{\text{стаб3}}$ – компоненти загального стабілізуючого моменту, зумовлені різноманітними збуджуючими факторами

$$M_{\text{стаб1}} = -W_1(\alpha) \frac{dW_z}{dt}; \quad (19)$$

$$M_{\text{стаб2}} = -W_2(\alpha) V_{x1}^2; \quad (20)$$

$$M_{\text{стаб3}} = -W_3(\alpha) f^2. \quad (21)$$

Досліджуємо вплив повздовжнього нахилу вертикального валу приводу повороту переднього мосту на величину стабілізуючого моменту.

На рис. 1 наведена схема для визначення впливу повздовжнього нахилу вертикального валу на стабілізуючий момент.

Рис. 1. Схема для визначення впливу повздовжнього нахилу вертикального валу на стабілізуючий момент
Джерело: розроблено авторами.

Стабілізуючий момент, обумовлений повздовжнім нахилом вертикального валу приводу поворотного мосту (рис. 1) розраховується за виразом (22):

$$M_{\text{стаб}} = -R_{\beta_1} l, \quad (22)$$

де l – плече дії бокової сили. Розраховується за виразом (23):

$$l = Z_{01} \sin \beta \cos \alpha. \quad (23)$$

Бокова сила R_{δ_1} , яка діє на колеса передньої осі, визначена раніше в роботі [8]:

$$R_{\delta_1} = m_T \sec \alpha \times \left(\frac{b^2 + i_z^2 + f h b}{L} \frac{dW_z}{dt} + \frac{b + f h}{L^2} \tan \alpha V_{x1}^2 \right) + f m_T g \frac{b}{L} \tan \alpha. \quad (24)$$

Після підстановки виразів (23) і (24) в (22) і перетворень знаходимо

$$M'_{\text{стаб}} = -\frac{m_T Z_{01} \sin \delta}{L} \times \left[(b^2 + i_z^2 + f h b) \frac{dW_z}{dt} + \frac{b + f h}{L} \tan \alpha V_{x1}^2 + t g \beta \sin \alpha \right]. \quad (25)$$

Сумарний стабілізуючий момент в цьому випадку буде дорівнювати:

$$\sum M_{\text{стаб}} = M_{\text{стаб}} + M'_{\text{стаб}} = -\frac{m_T}{L} (f h_0 \sec \alpha + Z_{01} \sin \delta) \times \left[(b^2 + i_z^2 + f h b) \frac{dW_z}{dt} + \frac{b + f h}{L} \tan \alpha V_{x1}^2 + t g \beta \sin \alpha \right]. \quad (26)$$

Аналіз отриманого виразу (26) показує, що виконання повздовжнього нахилу на кут вертикального валу приводу поворотного мосту дозволяє збільшити сумарний стабілізуючий момент. Відносно збільшення (при порівнянні виразів (13) і (26)) буде дорівнювати:

$$M_{\text{стаб}} = \frac{Z_{01} \sin \delta}{f h_0 \sec \alpha}. \quad (27)$$

Таким чином, із збільшенням Z_{01} і δ величина $\beta M_{\text{стаб}}$ вище.

Висновки

1. В результаті проведеного дослідження визначено аналітичні вирази для розрахунку стабілізуючого моменту, який діє на передній поворотний

міст тракторного самохідного шасі. Величина вказаного моменту залежить від кута повороту моста, кутового прискорення машини в площині дороги, квадрата лінійної швидкості та коефіцієнта опору коченню направляючих коліс.

2. Використання повздовжнього нахилу верти-

кального валу приводу поворотного мосту дозволяє збільшити стабілізуючий момент.

Вказане збільшення тим більше, чим більше кут нахилу вертикального валу в повздовжній площині.

Список літератури

1. Колесников К. С. Автоколебания управляемых колес автомобиля. Москва : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1955. 238 с.
2. Фалькевич Б. С. Теория автомобилей. Москва : Машгиз, 1963. 240 с.
3. Лысов М. И. Рулевые управления автомобилей. Москва : Машиностроение, 1964. 248 с.
4. Литвинов А. С. Управляемость и устойчивость автомобиля. Москва : Машиностроение, 1971. 416 с.
5. Гацько В. И., Подригало М. А., Клец Д. М. Оценка управляемости грузового автомобиля при малых колебательных отклонениях управляемых колес от нейтрального положения. *Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Технічні науки*. 2012. № 124(2). С. 95-103.
6. Подригало М. А., Бобошко А. А., Разарёнов Л. В., Закапко А. Г., Зинченко Е. И., Краснокутский В. М. Оценка легкости управления передним поворотным мостом перспективного тракторного самоходного шасси. *Вісник національного технічного університету "ХПР"*. 2020. № 2. С. 84-89.
7. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. Москва : Высшая школа, 1963. 255 с.
8. Маневренность и тормозные свойства колесных машин / под ред. М. А. Подригало. Харьков : ХНАДУ, 2003. 403 с.
9. Стабильность эксплуатационных свойств колесных машин: монография / Подригало М. А. и др. Харьков : ХНАДУ, 2003. 614 с.
10. Бобошко О. А. Підвищення маневреності колісних тракторів і самохідних шасі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.02. Харків, 2002. 20 с.
11. Акопян Р. А., Макаров В. В. Исследования влияния некоторых колебательных параметров пневматической подвески управляемых колес с различными направляющими устройствами на устойчивость движения. *Труды ГСКС по автобусам*. 1971. № 2. С. 64-77.
12. Експлуатаційні властивості автотранспортних засобів. Маневреність. Керованість. Стійкість / Сахно В. П. та ін. Донецьк : ЛАНДОН – XXI, 2015. Частина 3. 400 с.
13. Артемов Н. П. Определения критериев устойчивости движения и управляемости шарнирно-сочлененных тракторов. Харьков : ХГТУСХ, 1999. С. 194-198.
14. Подригало М. А., Полянський О. С., Дубінін Є. О. Керованість та стійкість тракторів та тракторних поїздів. Харків : ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2018. 279 с.

Надійшла до редколегії 18.08.2021

Схвалена до друку 16.11.2021

Відомості про авторів:

Подригало Михайло Абович

доктор технічних наук професор
завідувач кафедри
Харківського національного
автомобільно-дорожного університету,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>

Закапко Олександр Григорович

заступник начальника
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-6934-2568>

Information about the authors:

Mikhail Podrigalo

Doctor of Engineering Science Professor
Head of Department
of Kharkiv National Automobile
and Highway University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>

Olexander Zakapko

Deputy Commandant
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University of armaments,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6934-2568>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ МОМЕНТОВ НА ПЕРЕДНЕМ ПОВОРОТНОМ МОСТЕ ТРАКТОРНОГО САМОХОДНОГО ШАССИ

М.А. Подригало, А.Г. Закапко

В статье исследуются стабилизирующие моменты на переднем поворотном мосте тракторного самоходного шасси. Целью статьи является повышение управляемости и стойкости автомобилей с передним поворотным мостом за счет увеличения стабилизирующих моментов. Представлены результаты определения стабилизирующих моментов, действующих на передний поворотный мост при движении по прямой и при повороте. Предложено дополнительно устанавливать вал привода поворота переднего моста под углом к вертикали в продольной плоскости симметрии самоходного шасси. Определены аналитические зависимости стабилизирующих моментов от линейной скорости самоходного шасси, угла и угловой скорости поворота моста, а также от геометрических и весовых параметров машины.

Ключевые слова: тракторное самоходное шасси, поворотный передний мост, стабилизирующий момент, продольный наклон переднего вала.

RESEARCH OF STABILIZING MOMENTS ON THE FRONT STEERING AXLE OF A SELF-PROPELLED TRACTOR CHASSIS

M. Podrigalo, O. Zakapko

It has been established that the use of a pivoting front axle on a universal-row-crop tractor self-propelled chassis makes it possible to provide mechanized hitching of machines and tools in the center-to-center zone, improve maneuverability and controllability, especially when changing the front wheel track during operation. The analysis of the influence of various factors on the stability of the movement of wheeled machines and guide wheels is carried out. When analyzing recent studies and publications, it was found that the stabilizing moments acting on the front balancer swing axle were not considered. The article examines the stabilizing moments on the front swing axle of a tractor self-propelled chassis. The purpose of the article is to improve the handling and stability of vehicles with a front swivel axle by increasing the stabilizing moments. The results of determining the stabilizing moments acting on the front steering axle when moving in a straight line and when turning are presented. It is proposed to additionally install the front axle swing drive shaft at an angle to the vertical in the longitudinal plane of symmetry of the self-propelled chassis. Analytical dependences of the stabilizing moments on the linear speed of the self-propelled chassis, the angle and angular speed of the bridge swing, as well as on the geometric and weight parameters of the machine have been determined. The use of the longitudinal inclination of the vertical shaft of the swing axle drive increases the stabilizing moment. The specified increase is the greater, the greater the angle of inclination of the vertical shaft in the longitudinal plane.

Keywords: self-propelled tractor chassis, swivel front axle, stabilizing moment, longitudinal inclination of the front shaft.