

УДК 629.017

Подригало М.А., д.т.н.¹, Полянский А.С., д.т.н.¹, Клец Д.М., к.т.н.¹,
Задорожня В.В.²

1 — ХНАДУ, г. Харьков; 2 — ХНТУСХ, г. Харьков

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СИЛЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОЛЕСНЫХ МАШИН ПРИ БОКОВОМ ОПРОКИДЫВАНИИ

Полученные критериальные выражения оценки поперечной устойчивости положения колесной машины в каждом диапазоне динамических возмущений позволяют определить предельно допустимый импульс возмущающей силы.

Постановка проблемы

Потеря устойчивости положения, сопровождающаяся опрокидыванием колесных машин, приводит к большому количеству человеческих жертв и значительному материальному ущербу. Несмотря на многочисленные исследования, посвященные потере устойчивости машины при боковом опрокидывании, остается неисследованным характер возмущенного движения при различных начальных воздействиях.

На основе предложенных в настоящей статье критериев исследовано возмущенное движение колесной машины при опрокидывании. Определены три диапазона значений возмущающей силы, каждому из которых соответствует свой характер протекания возмущенного движения. Первый диапазон соответствует состоянию статической устойчивости машины, при котором возмущенное движение возникает. Второй диапазон — вращательному возмущенному движению, а третий — плоскопараллельному возмущенному движению. Получены критериальные выражения для оценки устойчивости колесных машин при боковом опрокидывании.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованию устойчивости колесных машин при боковом опрокидывании и анализу последствий потери устойчивости положения посвящены работы [1, 2, 3]. Однако в указанных работах не исследован характер движения машины в поперечной плоскости при различных величинах динамических возмущений, в связи с чем оценка поперечной динамической устойчивости является неполной.

Цель работы

Целью исследования является повышение поперечной динамической устойчивости положения колесных машин путем предотвращения опасных режимов эксплуатации при использовании более совершенных критериев оценки устойчивости.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить пороговые значения парциальных вертикальных линейных ускорений для каждого диапазона динамических возмущений;
- определить критериальные выражения для оценки поперечной устойчивости положения колесной машины в каждом диапазоне динамических возмущений.

Материалы и результаты исследования

Схема сил, действующих на колесную машину в различные моменты времени при боковом опрокидывании на поперечном уклоне, приведена на рис. 1.

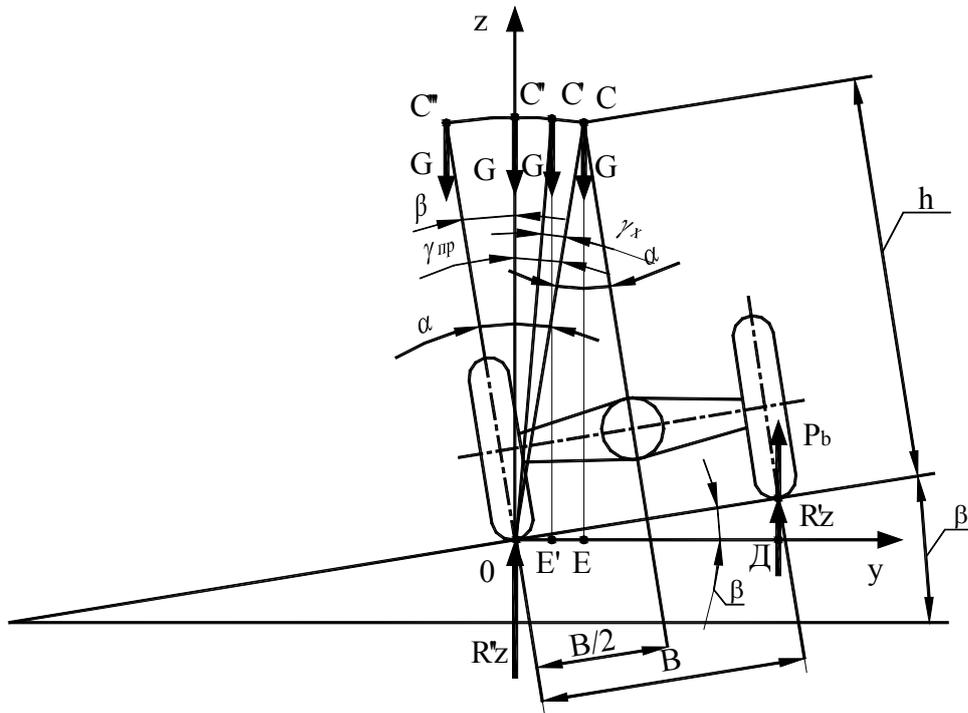


Рис. 1. Схема сил, действующих на колесную машину при боковом опрокидывании на поперечном уклоне

Вертикальные реакции на менее нагруженном колесе оси

$$R'_z = \frac{(\overline{OE})}{(\overline{OD})} G = \frac{(\overline{OC}) \sin(\alpha - \beta)}{B \cos \beta} G = \frac{h \sin(\alpha - \beta)}{B \cos \alpha \cdot \cos \beta} G = \frac{h}{B} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) G, \quad (1)$$

где G — сила тяжести машины;

B — колея оси;

h — высота центра масс машины;

α — угол поперечной устойчивости машины;

β — угол поперечного уклона дороги.

Вертикальная реакция на более нагруженном колесе оси

$$R''_z = G - R'_z = \left[1 - \frac{h}{B} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta)\right] G. \quad (2)$$

Возмущенное движение не появится в случае, если кратковременное вертикальное возмущение (например сила P_e , приложенная в точке контакта менее нагруженного колеса с дорогой) не превышает величины R'_z . Это возможно в случае

$$P_e \leq mg \frac{h}{B} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta), \quad (3)$$

где m — масса машины;

g — ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Условие (3) ограничивает первый диапазон величины динамических возмущений, в котором сохраняется статическая устойчивость машины, т.е. отсутствует возмущенное движение.

Разделив левую и правую части неравенства (3) на массу m машины, получим условие ограничения вертикальных парциальных ускорений

$$\dot{V}_{z_0}^{П.В} \leq g \frac{h}{B} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta), \quad (4)$$

где $\dot{V}_{Z_0}^{\Pi.B}$ — начальное вертикальное парциальное возмущающее ускорение.

При невыполнении условий (3) и (4) происходит поворот остова машины в поперечной плоскости относительно точки О, т.е. возмущенное движение является вращательным.

При величинах возмущающей силы P_e , превышающих величину силы тяжести G , происходит отрыв обоих колес оси от опорной поверхности и остов совершает в потерянной плоскости плоскопараллельное движение. Этому условию соответствуют диапазоны возмущающих сил P_e и вертикальных парциальных возмущающих ускорений:

$$P_e > G; \quad (5)$$

$$\dot{V}_{Z_0}^{\Pi.B} > g. \quad (6)$$

В таблице приведены диапазоны изменения динамических (P_e) и кинематических ($\dot{V}_{Z_0}^{\Pi.B}$) параметров возмущения, соответствующих различным видам возмущенного движения. Приведенные в таблице 1 границы диапазонов возмущений позволяют определить характер (вид) возмущенного движения колесной машины в поперечной плоскости при опрокидывании. В таблице приведены преобразованные выражения (3) и (4), учитывающие соотношение $\frac{h}{B} = 0,5 \operatorname{ctg} \alpha$.

Таблица 1

Диапазоны изменения параметров возмущения и характеристика возмущенного движения

Параметры возмущений	Диапазоны возмущений		
	1-ый Статическая устойчивость	2-ой Вращательное возмущенное движение	3-ий Плоскопараллельное движение
Динамический P_e	$0 \leq P_e \leq 0,5G(1 - \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha})$	$0,5G(1 - \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha}) < P_e \leq G$	$P_e > G$
Кинематический $\dot{V}_{Z_0}^{\Pi.B}$	$0 \leq \dot{V}_{Z_0}^{\Pi.B} \leq 0,5g(1 - \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha})$	$0,5g(1 - \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha}) < \dot{V}_{Z_0}^{\Pi.B} \leq G$	$\dot{V}_{Z_0}^{\Pi.B} > g$

Отрыв менее нагруженного колеса оси от опорной поверхности еще не означает потери устойчивости положения колесной машины в поперечной плоскости.

Нами получено выражение для определения изменения потенциальной энергии машины при повороте остова в поперечной плоскости на предельный угол $\gamma_x = \gamma_{np}$ (рис. 1).

$$\Delta W_n = mgh \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha}. \quad (7)$$

При попадании возмущающего воздействия во 2-ой диапазон (таблица 1) остов совершает вращательное движение. В этом случае кинетическая энергия возмущенного движения может быть определена как

$$W_k^e = I_0 \cdot \frac{(w_x^{B.II})^2}{2}, \quad (8)$$

где I_0 — момент инерции остова машины относительно точки О:

$$I_0 = mi_x^2 + mh^2 \sec^2 \alpha = mh^2 \sec^2 \alpha \left(1 + \frac{i_x^2}{h^2} \cos^2 \alpha\right), \quad (9)$$

где $w_x^{B.\Pi}$ — парциальная (возмущающая) угловая скорость остова относительно продольной оси ОХ,

$$w_x^{B.\Pi} = \int_0^{t_\epsilon} \dot{w}_x^{B.\Pi} dt; \quad (10)$$

где t_ϵ — время действия возмущения;

$\dot{w}_x^{B.\Pi}$ — парциальное возмущающее угловое ускорение.

Принимая возмущающее (парциальное) ускорение величиной постоянной

$$\dot{w}_x^{B.\Pi} = w_{x0}^{B.\Pi} = const, \quad (11)$$

преобразуем (10) к виду

$$w_x^{B.\Pi} = \dot{w}_{x0}^{B.\Pi} \cdot t_\epsilon, \quad (12)$$

где $\dot{w}_{x0}^{B.\Pi}$ — начальное угловое возмущающее (парциальное) ускорение,

$$\dot{w}_{x0}^{B.\Pi} = \frac{M\epsilon}{I_0} = \frac{P_\epsilon \cdot B \cdot \cos \beta}{I_0}; \quad (13)$$

где $M\epsilon$ — возмущающий момент.

Выражение (8), с учетом соотношений (9), (12) и (13), примет следующий вид:

$$W_k = (P_\epsilon \cdot t_\epsilon)^2 \frac{B^2}{2mh^2} \cdot \frac{\cos^2 \beta \cos^2 \alpha}{1 + \frac{i_x^2}{h^2} \cos^2 \alpha}. \quad (14)$$

Поперечная динамическая устойчивость положения будет обеспечена (опрокидывание не произойдет) в случае

$$W_k \leq \Delta W_{\Pi}. \quad (15)$$

После подстановки выражений (7) и (14) в неравенство (15) получим

$$(P_\epsilon \cdot t_\epsilon)^2 \frac{B^2}{2mh^2} \cdot \frac{\cos^2 \beta \cos^2 \alpha}{1 + \frac{i_x^2}{h^2} \cos^2 \alpha} \leq mgh \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha}. \quad (16)$$

Учитывая, что $tg \alpha = \frac{B}{2h}$, из неравенства (16) определим условие устойчивости:

$$P_\epsilon \cdot t_\epsilon \leq m \sqrt{gh \left(1 + \frac{i_x^2}{h^2} \cos^2 \alpha\right) \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\sin 2\alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta}}. \quad (17)$$

Выражение (17) показывает условие, которому должен удовлетворять импульс возмущающей силы при сохранении поперечной устойчивости положения машины во 2-ом диапазоне возмущающих действий.

Разделив левую и правую части неравенства (17) на массу m , получим условие ограничения влияния кинетического возмущения — вертикальной парциальной скорости $V_Z^{B,\Pi}$ точки контакта менее нагруженного колеса с дорогой (рис.1).

$$V_Z^{B,\Pi} \leq \sqrt{gh(1 + \frac{i_x^2}{h^2} \cos^2 \alpha) \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin 2\alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta}}. \quad (18)$$

При попадании возмущающего воздействия в 3-ий диапазон остов машины совершает в поперечной плоскости плоскопараллельное движение.

Кинетическая энергия плоскопараллельного движения складывается из кинетических энергий поступательного и вращательного движений. Кинетическая энергия поступательного движения, накопленная остом колесной машины при действии вертикального динамического возмущения, не влияет на ее опрокидывание. На опрокидывание оказывает влияние только уровень накопленной кинетической энергии вращательного движения. Поэтому условием сохранения устойчивости положения машины в поперечной плоскости будет являться следующее:

$$\Delta W_{\Pi} \geq W_k^B - W_k^{\Pi}, \quad (19)$$

где W_k^B, W_k^{Π} — кинетические энергии вращательного и поступательного движений,

$$W_k^B = \frac{I_C}{2} (w_x^{B,\Pi})^2, \quad (20)$$

$$W_k^{\Pi} = \frac{m}{2} (V_Z^{B,\Pi})^2, \quad (21)$$

где $V_Z^{B,\Pi}$ — парциальная вертикальная скорость возмущенного движения,

$$V_Z^{B,\Pi} = \int_0^{t_6} \dot{V}_Z^{B,\Pi} dt; \quad (22)$$

где $\dot{V}_Z^{B,\Pi}$ — парциальное вертикальное ускорение (кинетическое возмущение).

Принимая, что

$$\dot{V}_Z^{B,\Pi} = \dot{V}_{Z0}^{B,\Pi} = \frac{P_6}{m}, \quad (23)$$

преобразуем (22) к виду

$$V_Z^{B,\Pi} = \dot{V}_Z^{B,\Pi} \cdot t_6. \quad (24)$$

Выражение (19), с учетом (20), (21), (23), (24), (12) и (13), примет вид:

$$mgh \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha} \geq 2(P_6 \cdot t_6)^2 \frac{tg^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta \cos^2 \alpha}{mi_x^2} - \frac{(P_6 \cdot t_6)^2}{2m}. \quad (25)$$

Из неравенства (25) определим допустимый уровень импульса силы

$$P_6 \cdot t_6 \leq m \sqrt{gh(1 + i_x^2) \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\sin 2\alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta - 0,5i_x^2 \cos \alpha}}. \quad (26)$$

Разделив левую и правую части неравенства (26) на массу m , получим условие ограничения вертикальной парциальной (возмущающей) скорости точки контакта наименее нагруженного колеса с дорогой:

$$V_Z^{B.II} \leq \sqrt{gh \cdot i_x^2 \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\sin 2\alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta - 0,5 \cdot i_x^2 \cos \alpha}} \quad (27)$$

Принимая P_e равной граничным значениям, приведенным в таблице, определим области допустимых значений длительности действия возмущений t_e на границах диапазонов:

$$t_e \leq \frac{2}{1 - \frac{tg\beta}{tg\alpha}} \sqrt{\frac{h}{g} \left(1 + \frac{i_x^2}{h^2} \cos^2 \alpha\right) \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\sin 2\alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta}} \quad (28)$$

– на границе 1-го и 2-го диапазонов возмущений;

$$t_e \leq \sqrt{\frac{h}{g} i_x^2 \frac{1 - \cos(\alpha - \beta)}{\sin 2\alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos^2 \beta - 0,5 \cdot i_x^2 \cos \alpha}} \quad (29)$$

– на границе 2-го и 3-го диапазонов возмущений.

Выводы

В известных исследованиях не определены характер возмущенного движения остова колесной машины в поперечной плоскости при различных начальных возмущающих действиях. Приведенные в таблице границы диапазонов возмущений позволяют определить характер (вид) возмущенного движения.

Полученные критериальные выражения оценки поперечной устойчивости положения колесной машины в каждом диапазоне динамических возмущений позволяют определить предельно допустимый импульс возмущающей силы.

Список литературы

1. Коновалов В.Ф. Устойчивость и управляемость машинно-тракторных агрегатов / В.Ф. Коновалов. — Пермь: Пермское книжное изд-во, 1969. — 440 с.
2. Джонс И.С. Влияние параметров автомобиля на дорожно-транспортные происшествия / И.С. Джонс. — М.: Машиностроение, 1979. — 207 с.
3. Дорошенко Н.А. Обоснование и разработка методов выбора параметров трактора типа Т-150 К по показателям плавности хода и устойчивости на транспортных работах: автореф. дис. на здобуття наук.ступеня канд. техн. наук: спец. 05.05.03. «Автомобілі та трактори» / Н.А. Дорошенко. — Х., 1990. — 26 с.

Стаття надійшла до редакції 14.07.10

© Подригало М.А., Полянський О.С., Клец Д.М., Задорожня В.В., 2010