

УДК 629.017

Е.А. Дубинин,  
А.С. Полянский,  
Д.М. Клец

## **Повышение точности оценки статической устойчивости аэродромной техники с шарнирно-сочлененной рамой**

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет  
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"*

Разработан метод, повышающий точность оценки углов статической устойчивости колесных шарнирно-сочлененных машин с учетом складывания их секций. Установлено, что для шарнирно-сочлененной колесной машины с номинальным тяговым усилием 30 кН угол статической устойчивости передней секции уменьшается на 15-30%, задней секции – не более чем на 8-10% вследствие конструктивных особенностей. Разработаны рекомендации в нормативные документы и программное обеспечение для предварительной оценки устойчивости положения. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и сертификации шарнирно-сочлененных машин.

**Ключевые слова:** метод оценки, статическая устойчивость, шарнирно-сочлененный, нормативный документ, программа.

### **Введение**

Оценка устойчивости положения колесных машин представляет собой сложную многокритериальную задачу ввиду большого количества факторов, влияющих на это эксплуатационное свойство. В настоящее время эта проблема приобретает все большую актуальность в связи с необходимостью сертификации расширяющегося модельного ряда колесных машин. Для шарнирно-сочлененных колесных машин такая оценка является обязательной в связи с их конструктивными особенностями, влияющими на устойчивость положения. Для оценки статической устойчивости возможно использовать различные подходы, которые имеют разную точность и затраты на их осуществление. Наиболее приемлемой является предварительная оценка устойчивости аналитически и окончательно – при помощи существующего оборудования на основе специально разработанных для шарнирно-сочлененных машин подходов.

### **1 Анализ последних исследований и публикаций**

Известно, что важным показателем для колесных машин, определение которого обязательно при проведении испытаний, является угол поперечной статической устойчивости [1, 2]. Этот показатель определяется при помощи специальных платформ, которые имеют возможность наклоняться, в соответствии со разработанными методами [3, 4]. В работе [5] предложен способ определения граничного угла поперечной устойчивости колесных машин с балансирной подвеской и полуприцепных машин без применения специального стендового оборудования на основе аналитического моделирования с учетом деформации шин в боковом направлении. Предложенный способ апробирован и используется в практике оценки устойчивости колесных машин [6].

Ряд авторов [7-9] также подчеркивает, что процесс бокового опрокидывания шарнирно-сочлененных машин характеризуется не только взаимодействием колес с опорной поверхностью, но и взаимным расположением секций. При этом

влияние наличия вертикального и горизонтального шарниров рамы на поперечную устойчивость изучено не в полной мере.

## **2 Формулирование цели статьи**

Целью работы является повышение точности оценки статической устойчивости колесных шарнирно-сочлененных машин с учетом взаимного складывания их секций. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать метод оценки углов статической устойчивости с учетом влияния конструктивных особенностей шарнирно-сочлененных машин;
- разработать рекомендации в нормативные документы и программное обеспечение для предварительной оценки устойчивости положения шарнирно-сочлененных машин.

## **3 Изложение основного материала**

В настоящее время для шарнирно-сочлененных машин подход к оценке статической устойчивости возможен при использовании специальных поворотных стендов. При этом требования к оценке угла статической устойчивости для машин с цельной рамой мало приемлемы для машин с шарнирно-сочлененными рамами вследствие конструктивных отличий, влияющих на устойчивость. После отрыва одного из колес наименее устойчивой секции машины с увеличением угла поперечного наклона происходит потеря устойчивости этой секции. Она опрокидывается на ограничительные упоры более устойчивой секции. При дальнейшем увеличении угла наклона происходит отрыв колеса более устойчивой секции и опрокидывание всей машины. В качестве критерия устойчивости для каждой секции возможно использование угла статической устойчивости, соответствующего моменту отрыва колеса, и определяемого аналитически по предлагаемому методу с учетом конструктивных особенностей таких машин.

Наибольшая опасность опрокидывания в поперечном направлении для шарнирно-сочлененных машин существует при нахождении на предельном уклоне с максимально сложенной рамой относительно оси опрокидывания, проходящей через характерные точки конструкции, параллельной горизонтальной образующей уклона (специального стенда).

В работе [10] приведены опорные контуры для секций шарнирно-сочлененной колесной машины при наличии балансира в задней секции. При складывании секций друг относительно друга центры масс секций смещаются относительно осей опрокидывания. При этом конфигурация опорных контуров шарнирно-сочлененной машины зависит также и от угла складывания  $\delta$ . При балансирном соединении секций между собой опорные контуры таких машин при  $0^\circ < \delta < 90^\circ$  представляют собой для балансирной части – равнобедренный треугольник с вершиной в точке пересечения продолжения оси балансира с вертикальной плоскостью, проходящей через ось колес небалансирной части, и с основанием, проходящим через центры площадок контакта колес балансирной части машины; для небалансирной части – неправильный треугольник с вершиной в точке пересечения оси балансира с вертикальной плоскостью, проходящей через ось колес балансирной части, и с основанием, проходящим через центры площадок контакта колес небалансирной части машины [10]. После замыкания

горизонтального шарнира обе секции будут иметь общий опорный контур. Ось опрокидывания машины в этом случае будет представлять собой отрезок, соединяющий между собой центры площадок контакта колес одного борта балансирной и небалансирной частей машины.

На рисунке 1 представлены рекомендуемые схемы установки шарнирно-сочлененной машины при определении угла статической устойчивости передней секции (рис. 1а), задней секции (рис. 1б) и при блокировании шарнира (рис. 1в). В данном случае балансирной является задняя секция.

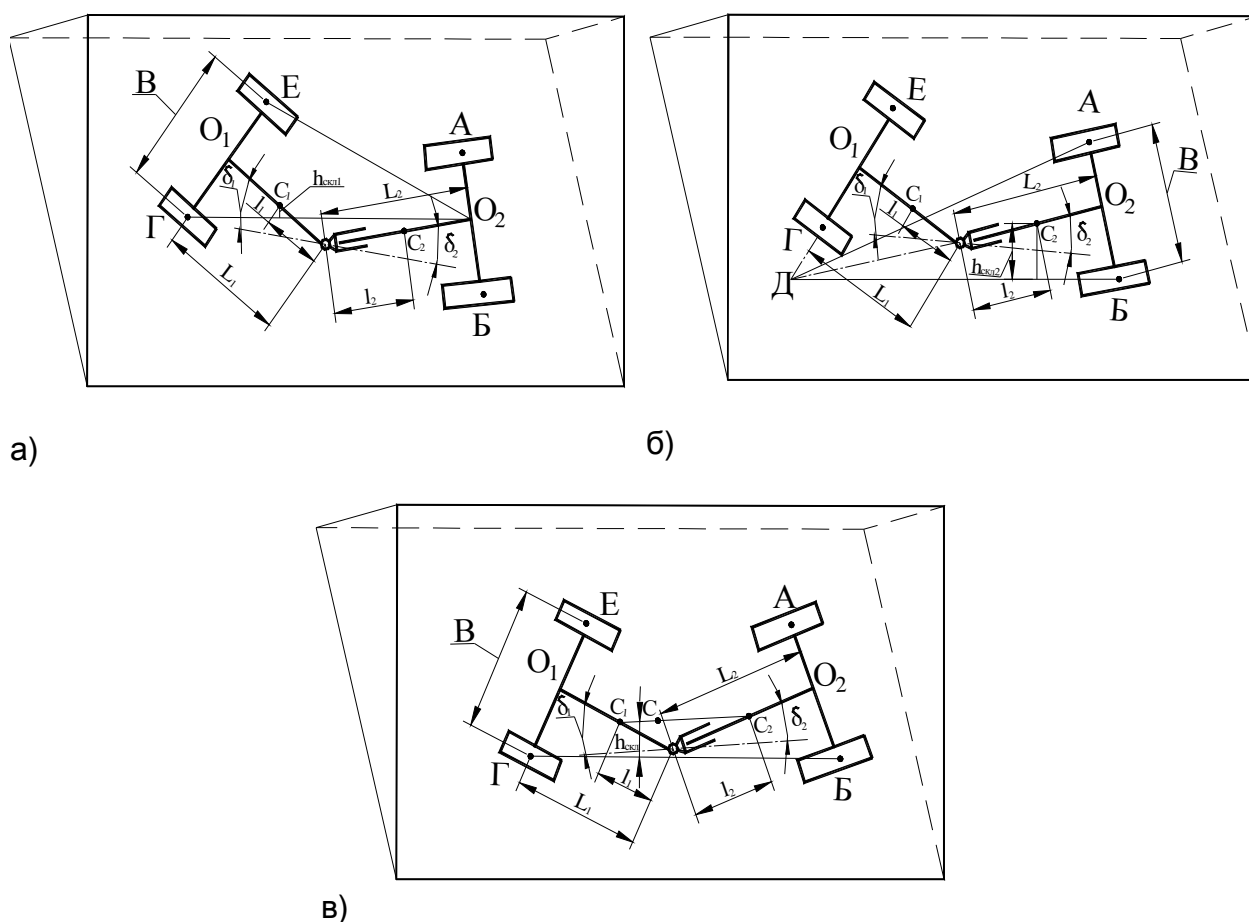


Рис. 1. Перспективные схемы определения углов статической устойчивости шарнирно-сочлененных машин

Для таких машин рекомендуется проверка устойчивости каждой секции и при блокировании шарнира с внесением предложений относительно корректировки нормативного документа [3] в части пункта 2.2.4.3. “Трактор (машину, СХА) устанавливают на платформе стенда таким образом, чтобы продольная ось и направление движения колес были параллельны оси наклона платформы с отклонением не более 1,5°, включают стояночные тормоза и низшую передачу”. Предлагается дополнить существующую формулировку таким образом: “Шарнирно-сочлененные машины устанавливаются таким образом, чтобы ось опрокидывания (определяется в зависимости от конструкции) была параллельна оси наклона платформы. Испытание проводят для каждой секции отдельно, принудительно удерживая вторую секцию от опрокидывания”.

Также пункт 2.2.4.5. "В технически обоснованных случаях измерение угла поперечной статической устойчивости проводят в рабочей комплектации, положении рабочих органов и ширине колеи, ухудшающих устойчивость машины (СХА)" предлагается записать следующим образом: "В технически обоснованных случаях измерение угла поперечной статической устойчивости проводят в рабочей комплектации, положении рабочих органов и ширине колеи, положении секций шарнирно-сочлененных машин (при максимальном угле складывания), ухудшающих устойчивость машины (СХА)".

Также необходимо учитывать смещение секций вследствие деформации шин [11]. Угол поперечной статической устойчивости секций можно найти по зависимости с учетом обозначенных выше уточнений, приняв допущение о расположении опорных контуров машины на опорной поверхности вследствие малой высоты расположения шарнира

$$\operatorname{tg} \alpha_{O1} = \frac{h_{скл1}}{h_{c1}}; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{O2} = \frac{h_{скл2}}{h_{c2}}, \quad (2)$$

где  $h_{скл1}, h_{скл2}$  – расстояния от центра масс до оси опрокидывания передней и задней секций машины соответственно  $h_{скл1} = f(\delta_1, R_{св1}, R_{см1}), h_{скл2} = f(\delta_2, R_{св2}, R_{см2})$ .

$\delta_1, \delta_2$  – углы складывания в горизонтальной плоскости передней и задней секций машины соответственно;

$R_{св1} = R_{св2} = R_{св}$  – свободный радиус колеса машины;

$R_{см1} = R_{см2} = R_{см}$  – статический радиус колеса машины;

$h_{c1}, h_{c2}$  – высота центра масс передней и задней секций машины соответственно.

С учетом полученных уточнений, на примере шарнирно-сочлененного колесной машины с номинальным тяговым усилием 30 кН ( $B=1,86$  м,  $R_{св} - R_{см} = 0...0,2$  м,  $\delta_1 = \delta_2 = 0...15^\circ$ ,  $h_{c1}=1,04$  м,  $h_{c2}=0,75$  м,  $L_1=1,48$  м,  $L_2=1,38$  м,  $l_1=1,25$  м,  $l_2=1,1$  м), применяемой в качестве аэродромной уборочной техники, были проведены соответствующие преобразования. Результаты исследований представлены в виде графиков изменения углов статической устойчивости на примере секций шарнирно-сочлененной машины (рис. 2).

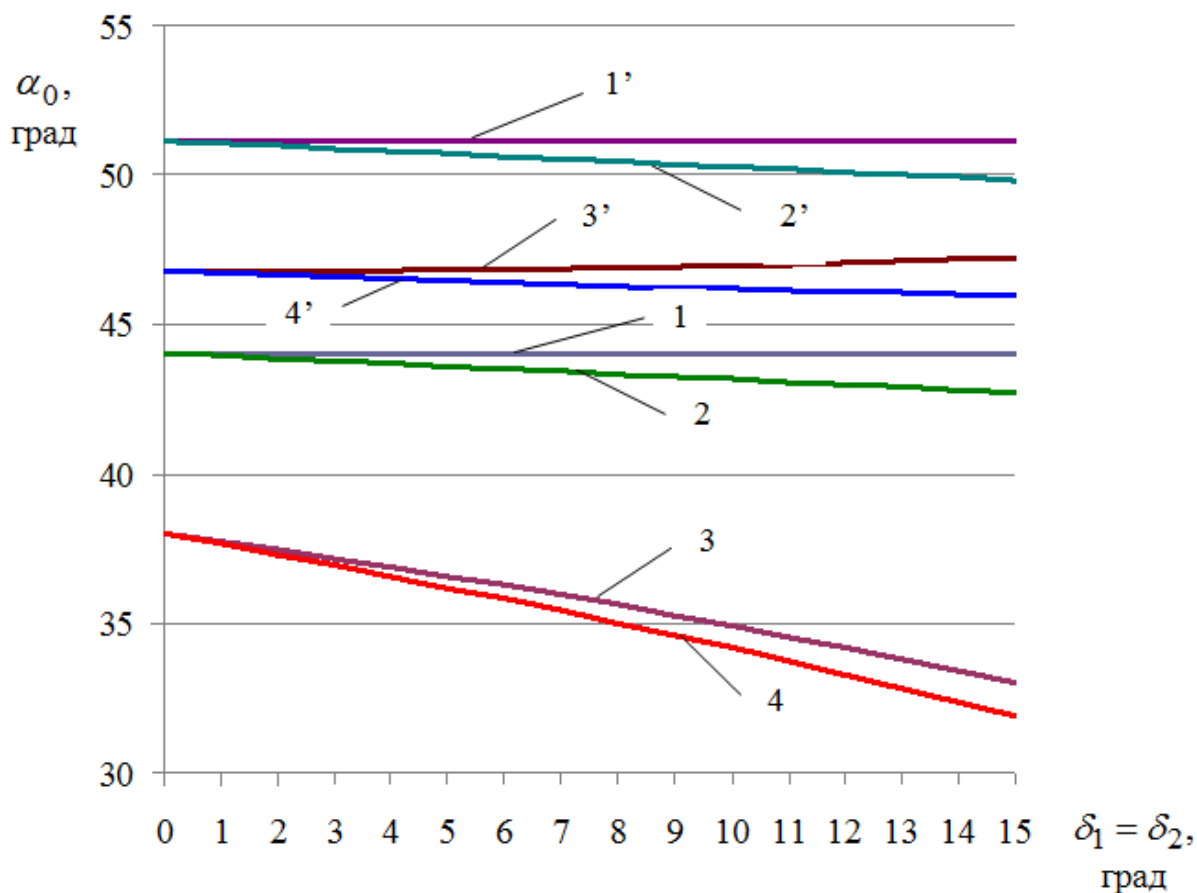


Рис. 2. Графики изменения углов статической устойчивости секций шарнирно-сочлененной машины (' обозначена задняя секция):

1, 1', 2, 2' – рассчитанные по зависимости  $\alpha_0 = \arctg \frac{B}{2h_c}$  без учета и с учетом

прогиба шин соответственно; 3, 3', 4, 4' – рассчитанные в соответствии с разработанным методом без учета и с учетом прогиба шин соответственно

Установлено, что применение разработанного метода оценки статической устойчивости шарнирно-сочлененных колесных машин позволяет существенно повысить точность такой оценки с учетом особенностей изменения опорного контура. Для выбранных параметров шарнирно-сочлененной машины с номинальным тяговым усилием 30 кН установлено, что угол статической устойчивости передней секции уменьшается на 15-30%, задней секции – не более чем на 8-10%. Учет углов складывания секций в пределах до  $15^\circ$  позволяет уточнить углы статической устойчивости до  $5^\circ$ . Это связано, прежде всего, с конструктивными особенностями машины и расположением соединительного шарнира. Результаты исследований хорошо согласуются с результатами определения статической устойчивости тракторов "Кировец", основанных на силовом анализе секций трактора [12].

В результате проведенных исследований разработан метод оценки углов статической устойчивости, адаптированный для шарнирно-сочлененных колесных машин с учетом особенностей их конструкции. Практическое воплощение метода предложено в виде разработанного соответствующего программного обеспечения

SPSAV (Static Position Stability of Articulated Vehicles) для предварительной оценки статической устойчивости таких машин без использования дорогостоящего оборудования. Внешний вид экранной формы программы представлен на рисунке 3.

The screenshot shows the SPSAV software interface with the following data:

Ввод исходных данных:			
Колея B, м	1,86	Расстояние от передней оси до шарнира L1, м	1,48
Высота центра масс hc1, м	1,04	Расстояние от задней оси до шарнира L2, м	1,38
Высота центра масс hc2, м	0,75	Расстояние от центра масс передней секции до шарнира l1, м	1,25
Угол поворота $\delta_1$ , град	15,0	Расстояние от центра масс задней секции до шарнира l2, м	1,1
Угол поворота $\delta_2$ , град	15,0		
Радиус колеса статический Rст, м	0,6		
Радиус колеса свободный Rсв, м	0,8		
<b>РАСЧЕТ</b>			
Результаты расчета:			
Угол поперечной статической устойчивости передней секции $\alpha_1$ , град			<b>32</b>
Угол поперечной статической устойчивости задней секции $\alpha_2$ , град			<b>46</b>

The diagram on the right illustrates the geometry of the articulated vehicle, showing the front and rear sections, their centers of mass (C, C1, C2), and the distances (L1, L2, l1, l2) from the pivot points to the centers of mass. The wheel radii (Rст, Rсв) and steering angles ( $\delta_1, \delta_2$ ) are also indicated.

Рис. 3. Внешний вид экранной формы программы SPSAV

## Выводы

Разработан метод, повышающий точность оценки углов статической устойчивости колесных шарнирно-сочлененных машин с учетом взаимного складывания секций, позволяющий учесть особенности изменения опорного контура. Разработаны рекомендации в нормативные документы и программное обеспечение для предварительной оценки устойчивости положения в условиях отсутствия соответствующих дорогостоящих стендов. Предварительная оценка статической устойчивости на примере шарнирно-сочлененной колесной машины с номинальным тяговым усилием 30 кН показала, что угол статической устойчивости передней секции уменьшается на 15-30%, задней секции – не более чем на 8-10% вследствие конструктивных особенностей. Учет углов складывания секций в пределах до  $15^\circ$  позволяет уточнить углы статической устойчивости до  $5^\circ$ .

### Список литературы

1. Горбатов В. Спосіб визначення кута поперечної статичної стійкості тракторів і сільськогосподарських машин / В. Горбатов // Техніка АПК. – 2006. – № 12. – С. 15.
2. Лілевман І. Визначення граничного кута поперечної статичної стійкості мобільних сільськогосподарських машин методом фізичного моделювання / І. Лілевман, О. Лілевман, З. Терещук // Техніка і технології АПК. – 2010. – № 5. – С. 37-39.
3. ГОСТ 12.2.002-91. ССБТ. Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности. – Введ. 1992-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 61 с.
4. 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 [Текст]. – Чин. 2006-08-01. – К.: Мінагрополітики України, 2004. – 80 с.
5. Лілевман І. Визначення граничного кута поперечної статичної стійкості колісних та напівпричіпних машин із застосуванням аналітичного моделювання / І. Лілевман, О. Лілевман, М. Подольський // Техніка і технології АПК. – 2014. – № 1 (52). – С. 32-35.
6. М 5.4-04:2009 Методика визначення граничного кута поперечної статичної стійкості мобільних сільгоспмашин з балансируною 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.
7. Боклаг В.М. Анализ общей устойчивости шарнирно-сочленённых колесных машин: автореф. дисс. на соиск. степени канд. техн. наук / В.М. Боклаг. – Харьков, 1964. – 21 с.
8. Колышкин В.И. Устойчивость трактора с шарнирно-сочлененной рамой / В сб. научн. тр. МИИСП: Совершенствование сельскохозяйственных тракторов и автомобилей. – М., 1979. – С. 16-20.
9. Маршак С.Ф. Статическая и динамическая устойчивость одноосных тягачей с полуприцепами: автореф. дисс. на соиск. степени канд. техн. наук / С.Ф. Маршак. – М., 1966. – 20 с.
10. РД 50-233-81. Надежность в технике. Оценка параметров безопасности колесных и гусеничных машин по опрокидыванию. Характеристики динамической и статической устойчивости. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 62 с.
11. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз [и др.]; под общ. ред. В.И. Кнороза. – М.: Транспорт, 1976. – 238 с.
12. Шувалов Е.А. Теория и расчет трактора „Кировец” / Е.А. Шувалов, А.В.Бойков, Б.А. Добряков, М.Г. Пантюхин. Под общей редакцией А.В. Бойкова. – Л.: Машиностроение, 1980. – 208 с.

Поступила в редакцию 13.06.2016

## **Підвищення точності оцінки статичної стійкості аеродромної техніки з шарнірно-зчленованою рамою**

Розроблено метод, що підвищує точність оцінки кутів статичної стійкості колісних шарнірно-зчленованих машин з урахуванням складання їх секцій. Встановлено, що для шарнірно-зчленованої колісної машини з номінальним тяговим зусиллям 30 кН кут статичної стійкості передньої секції зменшується на 15-30%, задньої секції – не більше ніж на 8-10% внаслідок конструктивних особливостей. Розроблено рекомендації в нормативні документи та програмне забезпечення для попередньої оцінки стійкості положення. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та сертифікації шарнірно-зчленованих машин.

## **Improving of the Accuracy of Static Stability Estimation of Airfield Vehicle with Articulated Frame**

The method for improving the accuracy of articulated wheeled vehicles angles of static stability estimation, taking into account the folding of sections, is developed. It is established that for the articulated wheel vehicle with a nominal pulling force of 30 kN the static stability angle of the front section is reduced by 15-30%, and that of the rear section – by not more than 8-10% due to structural features. The recommendations to the normative documents and software for preliminary assessment of position stability are developed. The obtained results can be used in the design and certification of articulated vehicles.

### **Сведения об авторах:**

**Дубинин Евгений Александрович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра технологии машиностроения и ремонта машин, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина.

**Полянский Александр Сергеевич** – докт. техн. наук, профессор, кафедра технологии машиностроения и ремонта машин, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина.

**Клец Дмитрий Михайлович** – докт. техн. наук, доцент, кафедра автомобилей и транспортной инфраструктуры, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина.