

УДК 629.366

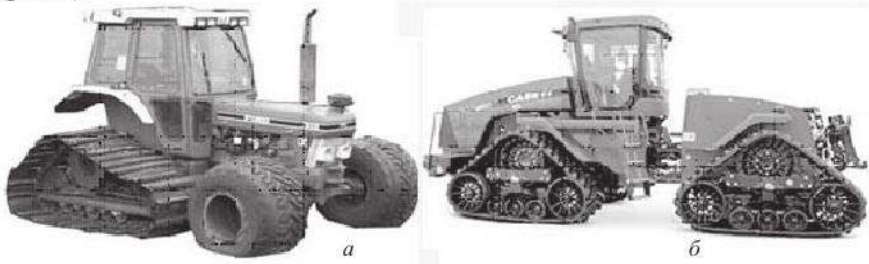
## МЕХАНИКА ПОВОРОТА ТРАКТОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

**И.П. Трояновская**, докт. техн. наук  
Челябинская государственная агроинженерная академия

*Стаття містить новий метод побудови моделей повороту. Загальний підхід до опису силової взаємодії колеса і гусениці з ґрунтом, який базується на законах механіки тертя, дає можливість застосувати запропонований метод на тракторах з комбінованим чи нетрадиційним рушієм. Різний набір кінематичних рівнянь зв'язку дає можливість відобразити будь-яку конструктивну схему і спосіб керування.*

**Ключові слова:** трактор, комбінований рушій, поворот, криволінійний рух, взаємодія з ґрунтом, рівняння зв'язку.

**Актуальность.** Исследованию поворота посвящено множество научных трудов, поскольку параметры этого типа движения во многом определяют производительность тракторного агрегата. На сегодняшний день уже сложились два основных направления в теории поворота, имеющих разные подходы к описанию движения – это теория поворота колесных [1] и гусеничных машин [2]. Однако, среди современных тракторных агрегатов все более широкое распространение приобретают машины с комбинированным или нетрадиционным типом двигателя (рис.1).



**Рис. 1.** Сельхозтрактора с комбинированным (а) и нетрадиционным (б) типом двигателя

© И.П. Трояновская.

Механізація та електрифікація сільського господарства. Вип. 97. 2013.

**Проблема.** Попытки применить к описанию движения таких тракторов готовые модели [3] не увенчались успехом в основном в силу ограничений, принимаемых при описании силового или кинематического взаимодействия. Так распространение на трактор с поворотными гусеницами (фирма Komatsu) или шарнирно-сочлененной рамой (фирма Case) теории поворота гусеничных машин [4], не представляется возможным в силу заложенных ограниченности кинематики (неповоротные опоры движителя) [2]. Классическая же теория поворота колесных машин, основанная на использовании упругого бокового увода [5], исключает скольжение относительно грунта [6].

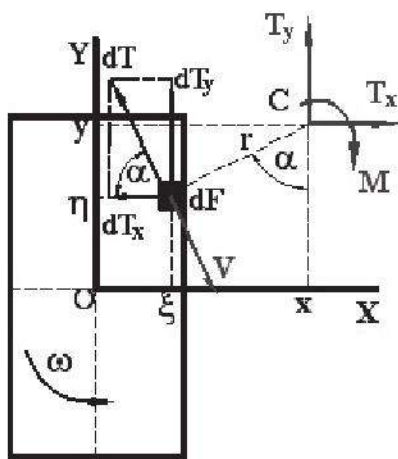
**Цель** - создание более универсальных моделей поворота, позволяющих описывать поворот трактора с комбинированным или нетрадиционным движителем.

#### Результаты исследований.

**1. Описание силового взаимодействия** для трактора с комбинированным движителем должно удовлетворять следующим требованиям:

- Общий подход к описанию взаимодействия колеса и гусеницы с грунтом;
- Учет скольжения в каждой точке контакта в обоих (вдоль и поперек) направлениях;
- Учет формы и размеров каждой опоры движителя;
- Учет распределения эпюры нормальных давления вдоль (поперек) контакта;
- Возможность учета упругих свойств движителя (пневмошины) или грунта.

При повороте со скольжением любая опора движителя совершает плоское движение (рис. 2). В каждой точке возникает элементарная сила трения  $dT = \varphi q dF$  ( $\varphi$  - коэффициент сцепления,  $q$  - нормальное давление на элементарной площадке  $dF$ ), направленная в противополо-



**Рис. 2.** Силовые факторы в контакте опоры движителя с грунтом

ложную сторону линейной скорости  $V$ , которая, в свою очередь, перпендикулярна радиусу  $r$ , соединяющему точку с мгновенным центром скоростей скольжения (МЦС). Приведем все элементарные силы к МЦС (точке  $C$ ), сложим их по площади контакта и получим выражения для проекций результирующей силы (в продольном  $T_y$  и поперечном  $T_x$  направлениях) и момента  $M$  [7]:

$$\left. \begin{aligned} T_x &= -q \int_{\eta} \int_{\xi} \varphi_x \frac{y - \eta}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} d\xi d\eta \\ T_y &= q \int_{\eta} \int_{\xi} \varphi_y \frac{x - \xi}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} d\xi d\eta \\ M &= q \int_{\eta} \int_{\xi} \frac{\varphi_x (y - \eta)^2 + \varphi_y (x - \xi)^2}{\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}} d\xi d\eta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

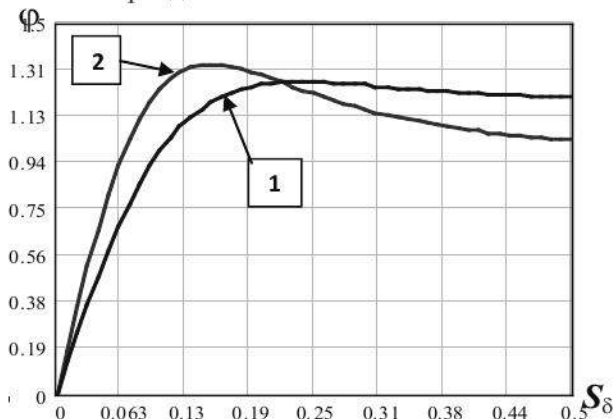
Преимущество предложенного подхода в том, что он основан не на эмпирических зависимостях, а строго на законах механики трения. В формулах (1) сразу просматривается зависимость результирующей силы и момента (когда величина силы растет - значение момента падает и наоборот), что соответствует взаимодействию при связях с трением [7,8]. Использование разных коэффициентов трения вдоль  $\varphi_y$  и поперек  $\varphi_x$  качения позволяет учесть влияние грунтозацепов (анизотропию взаимодействия) [9]. Введение нормального давления  $q$  под знак интеграла позволяет учесть любой закон его распределения по площадке контакта [9]. Для упругих свойств шины или грунта достаточно ввести закон изменения коэффициентов трения-сцепления  $\varphi_y$  и  $\varphi_x$  от скольжения  $S_\delta$  в точке (рис.3), который легко описывается формулой Кацыгина В.В. [10]:

$$\varphi_{x/y} = \varphi_{ax/y} \left( 1 + \frac{\chi_\delta}{ch(S_\delta/\lambda_\delta)} \right) th \left( \frac{S_\delta}{\lambda_\delta} \right),$$

где  $\varphi_{ax/y}$  - коэффициент сцепления (вдоль  $\varphi_{ay}$  или поперек  $\varphi_{ax}$ ) при полном скольжении;  $\chi_\delta, \lambda_\delta$  - коэффициенты, характеризующие тип грунта (для сыпучего грунта  $\chi_\delta = 0$ ) и точку его срыва (где кончается упругая деформация и начинается скольжение) [9].

Поскольку каждая точка, в силу разной удаленности от МЦС, имеет разное скольжение  $S_\delta$ , то и значения удельной касательной силы  $\varphi$  тоже будут разными. Таким образом, для определения в контакте

областей скольжения и упругого взаимодействия необходимо знать положение МЦС. Кроме того, значения самих силовых факторов ( $T_y$ ,  $T_x$ ,  $M$ ) тоже полностью определяются координатами ( $x, y$ ) МЦС (см. формулы 1). Таким образом, решение силовой задачи свелось к кинематике движения опоры движителя.



**Рис. 3.** Экспериментальная зависимость удельного тягового усилия от смещения: 1- сыпучий грунт; 2 – пластичный грунт

**2. Кинематическое взаимодействие.** На повороте скорость любой точки корпуса направлена перпендикулярно радиусу, опущенному из центра поворота трактора (т. О рис.4). Передача скорости от колес к корпусу осуществляется через ось (т. А), которая при наличии скольжения (упругое скольжение учтено при описании силового взаимодействия) совершают сложное движение:

- поступательное перекачивание по площадке контакта с теоретической скоростью  $\bar{V}_T$ , передаваемой моторно-трансмиссионной установкой,

- плоскопараллельное скольжение вместе с площадкой контакта со скоростью  $\bar{V}_{СК}$ , перпендикулярной радиусу  $r$ , проведенному из МЦС.

В результате векторного сложения  $\bar{V}_D = \bar{V}_T + \bar{V}_{СК}$ , действительная скорость  $\bar{V}_D$  оси колеса имеет некоторый увод (рис.4), природа которого может быть как упругие свойства движителя или грунта, так и скольжение относительно грунта.

Согласно законам механики, единственной точкой при плоскопараллельном движении, где отсутствует скорость скольжения  $\bar{V}_{СК}$ , является МЦС (т. С). Тогда действительная скорость точки корпуса  $\bar{V}_D$ ,

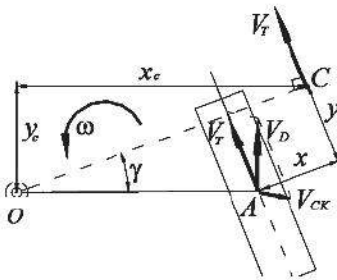
расположенной над МЦС, равна теоретической скорости  $\bar{V}_T$ , направленной вдоль плоскости вращения колеса. Это определяет, что МЦС опоры движителя лежит на перпендикуляре, опущенном из центра поворота трактора на плоскость ее вращения [11]. Математически эти условия можно записать в виде следующих уравнений связей:

$$x_c \sin \gamma - y_c \cos \gamma = 0, \quad (2)$$

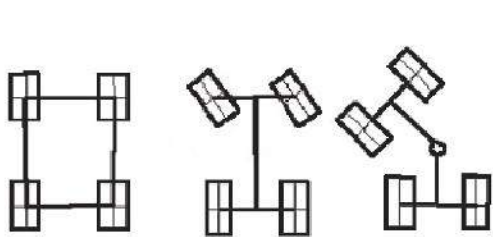
$$V_T = \omega(OC), \quad (3)$$

где  $x_c, y_c$  - координаты МЦС опоры движителя в общей системе координат, связанной с центром поворота трактора (см. рис.4),  $\gamma$  - угол поворота опоры относительно корпуса,  $(OC) = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$  - расстояние от центра поворота трактора до МЦС опоры.

В уравнение (2) входят координаты МЦС ( $x_c, y_c$ ) относительно центра поворота трактора, что с учетом преобразования координат позволяет отразить любую из возможных конструктивных схем (рис.5) с учетом геометрических параметров конкретного трактора (базы, колеи, числа опор и их взаимного расположения) [9].



**Рис. 4.** Кинематика произвольно расположенной опоры движителя



**Рис. 5.** Возможные конструктивные схемы: а – с неповоротными опорами, б – с поворотными опорами, в – с шарнирно-сочлененной рамой

Для каждой опоры, независимо от режима ее движения, можно записать по одному дополнительному уравнению геометрических связей (2).

Уравнение (3) отражает режим движения опоры (ведущий, ведомый, тормозной), что характеризует схему управления поворотом. Иногда уравнение кинематических связей (3) удобнее записать через силовые, а не через кинематические параметры [9]:

- а. ведомое колесо (гусеница, борт) характеризуется отсутствием

касательного тягового усилия  $T_y = 0$ , что с учетом выражений (1) имеет вид:

$$x = 0, \quad (4)$$

b. тормозное колесо (гусеница, борт) характеризуются тем, что координата МЦС в общей системе совпадает с центром поворота:

$$x_c = 0, \quad (5)$$

c. ведущие колеса с известным распределением между ними теоретических скоростей  $V_{T1} = kV_{T2}$  имеют вид:

$$\sqrt{x_{c1}^2 + y_{c1}^2} = k\sqrt{x_{c2}^2 + y_{c2}^2}, \quad (6)$$

d. межколесный дифференциал между опорами 1 и 2 обеспечивает равенство тяговых усилий  $T_{y1} = T_{y2}$ , что с учетом (1) имеет вид:

$$x_1 = x_2, \quad (7)$$

e. межосевой дифференциал между мостами с 1-2 и 3-4 опорами с коэффициентом пропорциональности  $\kappa$  можно записать в виде:

$$x_1 + x_2 = \kappa(x_3 + x_4), \quad (8)$$

f. бездифференциальная связь между 1 и 2 опорой движителя:

$$\dot{x}_{c1} = \dot{x}_{c2}. \quad (9)$$

**3. Методика построения модели стационарного поворота.** Модель составляется в естественных координатах подвижного трехгранника. В качестве неизвестных выступают две координаты центра поворота  $(x_0, y_0)$ , угловая скорость трактора  $\omega$  и  $2n$  неизвестных координат МЦС (где  $n$  – число опор движителя). Модель состоит из  $2n$  уравнений связи (1-9) и трех уравнений движения:

$$\left. \begin{aligned} -m\omega^2 y_0 &= \sum (T_{xi} \cos \gamma_i - T_{yi} \sin \gamma_i + fG_i \sin \gamma_i), \\ -m\omega^2 x_0 &= \sum (T_{xi} \sin \gamma_i + T_{yi} \cos \gamma_i - fG_i \cos \gamma_i), \\ 0 &= \sum \left( M_i + T_{yi} \sqrt{x_{ci}^2 + y_{ci}^2} - fG_i \left( \sqrt{x_{ci}^2 + y_{ci}^2} - x_i \right) \right). \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

Преимущество предлагаемой методики заключается в том, что она позволяет описать поворот произвольного трактора с любой конструктивной схемой, способом управления и типом движителя путем изменения набора уравнений связи. Данная модель была проверена натурным экспериментом на ряде машин с нетрадиционными схемами управления и типами движителя [9].

## Выводы

1. Предлагаемый подход описывает поворот трактора с колесным и гусеничным двигателем.

2. Он позволяет уже на этапе проектирования нового трактора производить оценку влияния конструктивных параметров и схем на характеристики поворота, проводя тем самым оптимизацию конструкции.

3. Кроме основных характеристик криволинейного движения (радиус поворота, тяговые и боковые усилия в контакте каждой опоры движителя), предлагаемая модель позволяет рассчитать ряд дополнительных параметров (боковой увод за счет скольжения и упругой составляющей, действительную скорость и скорость скольжения, определить в контакте каждой опоры области скольжения и сцепления и др.) [9].

## БИБЛІОГРАФІЯ

1. *Трояновская И.П.* Анализ развития теории поворота колесных машин / И.П. Трояновская // Вестник машиностроения. –2010. –№1. –С. 92-96.
2. *Трояновская И.П.* История развития теории поворота гусеничных машин / И.П. Трояновская // Вестник машиностроения. –2010. –№7. –С. 90-95.
3. *Фаробин Я.Е.* Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. - М.: Машиностроение, 1970 – 176 с.
4. *Исаев Е.Г.* Вопросы общей теории поворота гусеничного трактора / Е.Г. Исаев // Автореф. дис. ... докт. техн. наук, М.: МАДИ, 1970. – 60 с.
5. *Гладов Г.И.* Основы теории криволинейного движения и проектирования систем управления поворотом большегрузных транспортно-технологических агрегатов / Г.И. Гладов // Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: МАДИ (ТУ), 1998. – 40 с.
6. *Трояновская И.П.* Основные ошибки при описании силового взаимодействия колеса с грунтом на повороте / И.П. Трояновская // Автомобильная промышленность, –2009. –№8. –С. 17 - 19.
7. *Жуковский Н.Е.* Условие равновесия твердого тела, опирающегося на неподвижную плоскость некоторой площадкой и могущего перемещаться вдоль этой плоскости с трением / Н.Е. Жуковский // Труды Отделения физических наук общества любителей естествознания. –1897. –Вып. 1. –Т. IX.
8. *Опейко Ф.А.* Колесный и гусеничный ход / Ф.А. Опейко. - Минск: АСН БССР, 1960. – 228 с.

9. *Трояновская И.П.* Методология моделирования криволинейного движения тракторных агрегатов / И.П. Трояновская // Дис. ... докт. техн. наук. Челябинск: ЮУрГУ, 2011 – 296 с.
10. *Кацыгин В.В.* О закономерности сопротивления почв сжатию / В.В. Кацыгин // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства, –1962. –№4. –С. 28 - 31.
11. *Позин Б.М.* Кинематические соотношения при взаимодействии движителя с грунтом при повороте / Б.М. Позин, И.П. Трояновская // Вестник ЮУрГУ, серия Машиностроение. Челябинск: ЮУрГУ. –2005. –Вып. 7. –№14(54). – С.93 - 96.

### МЕХАНИКА ПОВОРОТА ТРАКТОРА С КОМБИНИРОВАННЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

*Статья содержит новый метод построения моделей поворота. Общий подход к описанию силового взаимодействия колеса и гусеницы с грунтом, основанный на законах механики трения, позволяет применить предложенный метод на тракторе с комбинированным или нетрадиционным движителем. Разный набор кинематических уравнений связи дает возможность отразить любую конструктивную схему и способ управления.*

**Ключевые слова:** трактор, комбинированный движитель, поворот, криволинейное движение, взаимодействие с грунтом, уравнения связи.

### MECHANICS OF TURN OF THE TRACTOR WITH A WHEELS AND A CATERPILLARS

*Clause contains a new method of construction of models of turn. The general approach to the description of power interaction of a wheel and a caterpillar with a ground is based on laws of mechanics of friction. It allows to apply the offered method on a tractor with a wheel and a caterpillar. The different set of the kinematic equations of communication enables to reflect any constructive scheme and a way of management.*

**Key words:** a tractor, the combined running system, turn, curvilinear movement, interaction with a ground, the equations of communication.