

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ПОВОРОТА ШАРНИРНОСОЧЛЕНЕННОЙ МАШИНЫ С ТРЕМЯ ОСЯМИ

Гурвич Ю. А., Третинников Д. Л., Петровский А. Л.

Белорусский национальный технический университет, Минск

*In the article have been considered a unsteady turn of hinged machine. The research is topical because the up-to-date state of open-cut method progress of mineral product on majority of operating enterprise is characterized by open cast mine deepening, by load distance increasing and by angle of ascent of track rising.*

Современный этап развития открытого способа разработки полезных ископаемых на большинстве действующих предприятий характеризуется интенсивным углублением карьеров, увеличением расстояний транспортирования и повышением углов подъема дорог. Проектные глубины карьеров достигают 600—800 м. При значительном углублении карьеров и увеличении затрат на добычу открытым способом интенсивными темпами ведутся работы по переводу некоторых карьеров на подземную добычу. Поэтому повысились требования к маневренности в сочетании с габаритными размерами машин и их грузоподъемностью, что предопределило появление новых конструкций машин, в том числе и шарнирно-сочлененных транспортных средств. Исследований, посвященных изучению силовых характеристик неустановившегося поворота шарнирно-сочлененных машин, в литературе проведено недостаточно [1-6]. Данная работа посвящена исследованию характеристик поворота трехосной шарнирно-сочлененной машины на примере подземного самосвала БелАЗ-75281. Работа является актуальной, так как в настоящее время резко увеличивается спрос на подземные машины.

Рассмотрим поворот машины в движении по горизонтальной поверхности с однородным фоном.

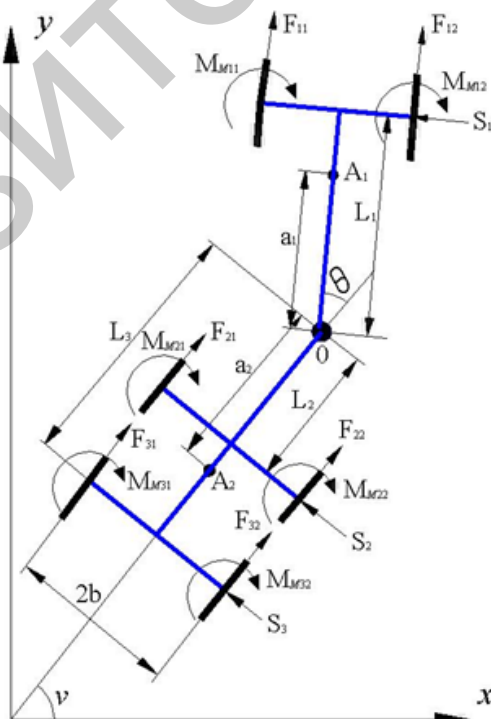


Рис. 1. Расчетная схема шарнирно-сочлененной машины

Расчетная схема машины в общем виде приведена на рис. 1, где  $O$  – вертикальный шарнир,  $A_1$  и  $A_2$  – центры тяжести передней и задней секций,  $F_{ij}$  – продольная реакция  $ij$ -го колеса,  $S_i$  – поперечная реакция  $i$ -й секции,  $M_{\mu ij}$  – момент сопротивления повороту  $ij$ -го колеса,  $M\theta$  – момент, необходимый для складывания секций машины, цифрами в индексах 11, 12, 21, 22, 31, 32 обозначены колеса, первая цифра – номер секции, а вторая – номер колеса (1 – левое, 2 – правое).

Положение машины определяется десятью обобщенными координатами  $x_0, y_0, v, \theta, \psi_{ij}$ , где  $x_0, y_0$  – координаты вертикального шарнира  $O$ ,  $\psi_{ij}$  – угол поворота  $ij$ -го колеса. Остальные координаты показаны на рис. 1.

На рис.2 представлены основные размеры самосвала БелАЗ-75281.

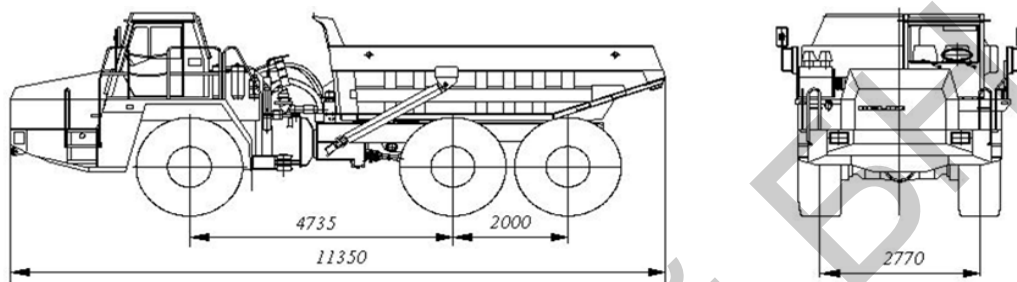


Рис. 2. Основные размеры самосвала БелАЗ-75281

Положения центров тяжести и массы секций самосвала БелАЗ-75281 показаны на рис. 3.

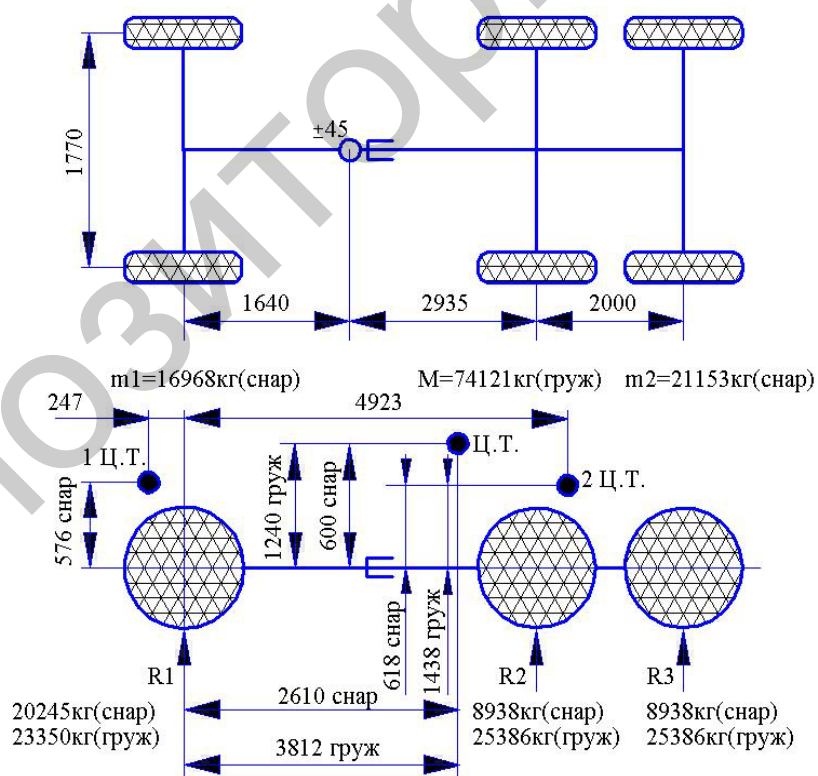


Рис. 3. Положение центров тяжести и массы секций самосвала БелАЗ-75281: снар – снаряженный; груз - груженный

Систему дифференциальных уравнений, описывающих поворот шарнирно-сочлененной машины при ее движении по горизонтальной плоскости, получим из уравнений Лагранжа второго рода (без вывода):

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k + R_k, \quad (1)$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы,  $q_k$  – обобщенная координата,  $Q_k$  – обобщенная сила соответствующая  $k$ -той координате,  $R_k$  – обобщенная сила реакций неголономных или кинематико-силовых связей, соответствующая  $k$ -той координате (которая в нашем случае принимает значения  $x, y, v$ ).

В итоге система дифференциальных уравнений второго порядка имеет вид:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x}_0 + [m_1 a_1 \sin v - m_2 a_2 \sin(v + \theta)]\dot{v} = m_2 a_2 \ddot{\theta} \sin(v + \theta) - \\ - m_1 a_1 \dot{v}^2 \sin v + m_2 a_2 (\dot{v} + \dot{\theta})^2 \sin(v + \theta) + R_x, \\ (m_1 + m_2)\ddot{y}_0 - [m_1 a_1 \cos v - m_2 a_2 \cos(v + \theta)]\dot{v} = m_2 a_2 \ddot{\theta} \cos(v + \theta) - \\ - m_1 a_1 \dot{v}^2 \sin v + m_2 a_2 (\dot{v} + \dot{\theta})^2 \sin(v + \theta) + R_y, \\ [m_1 a_1 \sin v - m_2 a_2 \sin(v + \theta)]\ddot{x} - [m_1 a_1 \cos v - m_2 a_2 \cos(v + \theta)]\dot{y}_0 + \\ + (J_1 + J_2 + m_1 a_1^2)\dot{v} = (J_2 + m_2 a_2^2)\ddot{\theta} + R_v, \\ J_{ij}\ddot{\psi}_{ij} + J_{\mathcal{D}} \frac{c_{ij}}{c_{\mathcal{D}}} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 c_{ij} \dot{\psi}_{ij} = \text{sign} \dot{\psi}_{ij} M_{\mu ij} + M_{\mathcal{D}} \frac{c_{ij}}{c_{\mathcal{D}}} - F_{ij} r_i, \end{cases} \quad (2)$$

где  $R_x, R_y, R_v$  определяются из следующих уравнений:

$$\begin{aligned} R_x &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 F_{ij} \cos[v + \theta(i-2)] - \sum_{i=1}^3 S_i \sin[v + \theta(i-2)]; \\ R_y &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 F_{ij} \sin[v + \theta(i-2)] + \sum_{i=1}^3 S_i \cos[v + \theta(i-2)]; \\ R_v &= \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 (-1)^j b_i F_{ij} + \sum_{i=1}^3 (-1)^i S_i L_i, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $c_{ij}$  – коэффициенты, определяющие кинематическую связь вала двигателя с  $ij$ -м колесом;  $M_{fij}$  – момент сопротивления перекачиванию  $ij$ -го колеса;  $M_{\mathcal{D}}$  – момент двигателя;  $m_1, m_2, J_1, J_2$  – массы и моменты инерции передней и задней секций;  $J_{ij}$  – момент инерции  $ij$ -того колеса и связанных с ним вращающихся деталей;  $J_{\mathcal{D}}$  – момент инерции двигателя.

Выразим буксование  $\delta$   $ij$ -го колеса самосвала, а также увод колес  $\varepsilon$   $i$ -й секции через обобщенные координаты и через их первые производные:

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= 1 - \frac{(-1)^j b_i [\dot{v} - \dot{\theta}(i-2)] + \dot{x}_0 \cos[v - \theta(i-2)] + \dot{y}_0 \sin[v - \theta(i-2)]}{r_i \dot{\psi}_{ij}}, \\ \varepsilon_i &= 1 - \frac{(-1)^{i+1} l_i [\dot{v} - \dot{\theta}(i-2)] - \dot{x}_0 \sin[v - \theta(i-2)] + \dot{y}_0 \cos[v + \theta(i-2)]}{\mathcal{S}_i}. \end{aligned} \quad (4)$$

Присоединяя уравнения (3) и (4) к системе уравнений (2), получим 18 уравнений, с 18-тью неизвестными:  $v, x_0, y_0, \psi_{ij}, F_{ij}, S_i$ , которые полностью описывают неустановившийся поворот шарнирно-сочлененной трехосной машины.

В результате решения системы 18 дифференциальных уравнений определяется момент  $M_\theta$ , необходимый для поворота самосвала:

$$M_\theta = m_1 a_1 [-\ddot{x}_0 \sin(v + \theta) + \ddot{y}_0 \cos(v + \theta)] + (J_2 + m_2 a_2^2)(\ddot{v} + \ddot{\theta}) + M_{\mu 11} + M_{\mu 22} + b_1(F_{11} - F_{22}) - S_1 l_1. \quad (5)$$

Схема решения системы уравнений (2) представлена на рис.4:

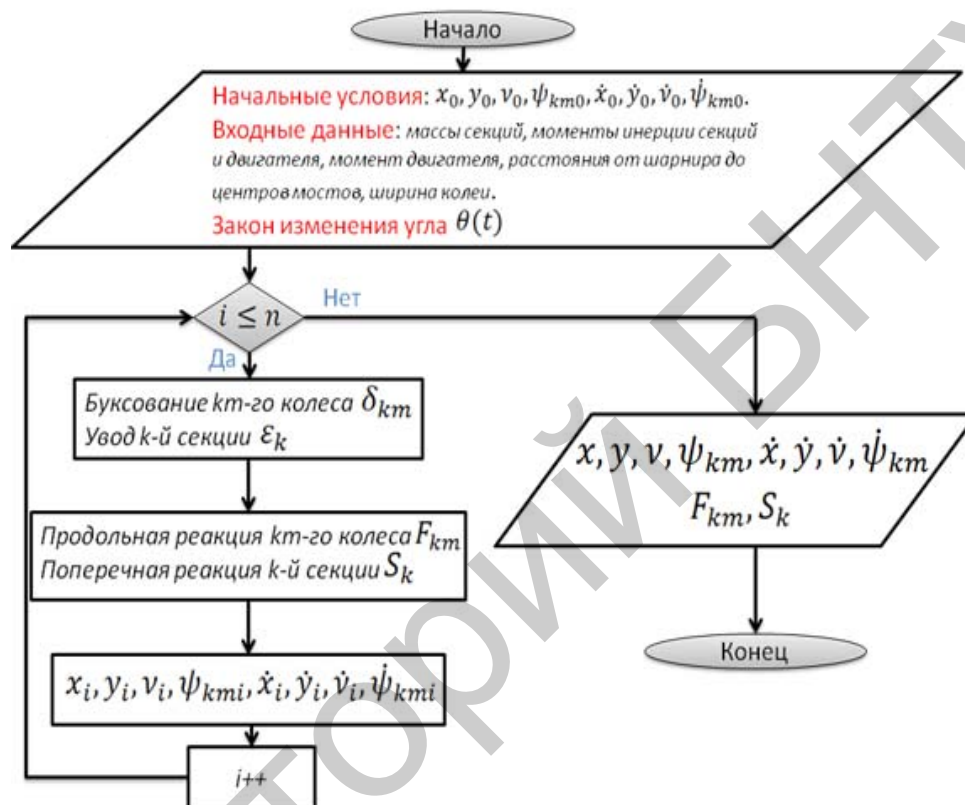


Рис. 4. Блок-схема решения системы дифференциальных уравнений

Таблица 1

Исходные данные

|   |             |
|---|-------------|
| Начальное время $t_n$ , с                                 | 0           |
| Конечное время $t_k$ , с                                  | 60          |
| Количество разбиений, $n$                                 | 20          |
| Масса передней секции $m_1$ , кг                          | 16968       |
| Масса задней секции $m_2$ , кг                            | 21153       |
| Расстояние от центра до первого моста $L_1$ , м           | 1640        |
| Расстояние от центра до второго моста $L_2$ , м           | 2935        |
| Расстояние от центра до третьего моста $L_3$ , м          | 2000        |
| Ширина колеи $b$ , м                                      | 2770        |
| Линейный закон изменения угла складывания секций $\theta$ | $9 \cdot t$ |

Используя исходные данные и данные табл. 1, решаем систему уравнений методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности. Результаты расчетов представлены на рис. 5–8.

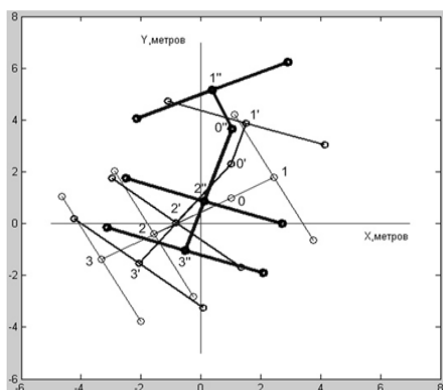


Рис. 5. Траектория поворота машины: 1-1'-1'' – траектория движения центра первого моста, 2-2'-2'', 3-3'-3'' – второго и третьего соответственно

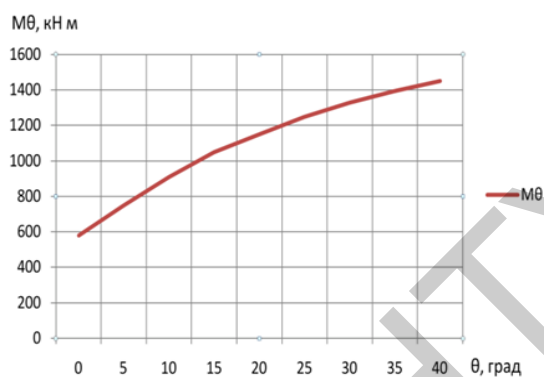


Рис. 6. Зависимость момента сопротивления повороту  $M_\theta$  в движении от угла складывания секций  $\theta$

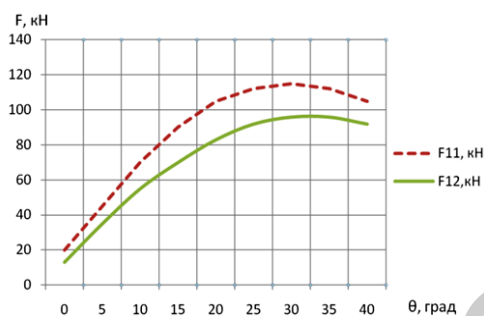


Рис. 7. Продольные силы колес передней секции:  $F_{11}$  – левого колеса;  $F_{12}$  – правого

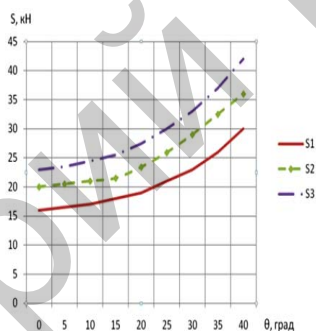


Рис. 8. Поперечные силы осей:  $S_1$  – первой оси;  $S_2$  – второй;  $S_3$  – третьей

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бойков А.В. Теория и расчет трактора «Кировец». – М.: Машиностроение, 1980. – 276 с.
2. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1970. – 324 с.
3. Скокан А.И. Исследование поворота шарниросочленённых колёсных машин. – М., 1973. – 89 с.
4. Ванцевич В.В. Динамика криволинейного движения колёсных машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 396 с.
5. Смирнов Г.А. Теория движения колёсных машин. – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.
6. Гришкевич А.И. Автомобили: теория. – Минск: Выш. шк., 1986. – 208 с.