

УДК 621.869.4:658

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ ТРАКТОРА СО СТОРОНЫ АГРЕГАТИРУЕМОГО НАВЕСНОГО ПЛУГА

В. Б. ПОПОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Представлена методика расчета тяговой нагрузки и нагрузки тяг механизма навески трактора общего назначения со стороны навесного плуга. Она включает схему действующих сил, исходную систему уравнений и результат ее решения в виде аналитических выражений для расчета как тяговой нагрузки со стороны плуга, так и действующих в тягах сил.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, трактор общего назначения, плуг навесной, механизм навески, верхняя тяга, нижняя тяга, внешняя нагрузка.

ANALYTICAL DEFINITION OF TRACTION LOAD OF TRACTOR FROM THE SIDE OF AGGREGATED MOUNTED PLOUGH

V. B. POPOV

Educational institution "Sukhoi State Technical University of Gomel", the Republic of Belarus

The method for calculating the traction load and the load of the linkage mechanism of the general-purpose tractor from the side of the mounted plow is presented. It includes a diagram of the acting forces, the original system of equations and the result of its solution in the form of analytical expressions for calculating both the traction load from the plow and the forces acting in the traction.

Keywords: automated design, general purpose tractor, mounted plow, linkage mechanism, top link, lower link, external load.

Введение

Необходимой составляющей в математическом обеспечении автоматизированного проектирования сельскохозяйственных тракторов – основного компонента машинно-тракторных агрегатов (МТА) – являются функциональные математические модели (ФММ) их рабочих режимов. Функциональные математические модели описывают режимы работы компонентов МТА и в том числе работу механизма навески (МН) трактора [1], связывающего последний с навесным плугом. Тяговая нагрузка на трактор, а также его МН со стороны плуга, как правило, определяется графоаналитически [2], [3], что затрудняет автоматизированный расчет тяговой нагрузки сельскохозяйственного трактора и выбор рациональных параметров его МН.

Цель работы – получить аналитические выражения для определения тяговой нагрузки трактора на основе формализованного описания как сил, действующих на МН и навесной плуг, так и рассчитываемых автоматизированно геометрических параметров пахотного агрегата.

Анализ нагруженности тяг механизма навески

Проектирование МН сельскохозяйственного трактора связано с выбором рациональных параметров его звеньев. Геометрическая модель МН и агрегируемого с ним навесного плуга представляется пространственной 3D-моделью. Проецируя 3D-модель на продольную плоскость симметрии трактора, получим ее плоский аналог в виде кинематической цепи (рис. 1).

Для определения силы тяги, направленной на преодоление проекции R_x главного вектора элементарных сил сопротивления почвы, В. П. Горячкин предложил рациональную формулу, определяющую взаимосвязь между основными факторами рабочего процесса плуга и общим сопротивлением, возникающим при его работе [4]:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = fG + kabn + \varepsilon abnv^2, \quad (1)$$

где P_1, P_2, P_3 – составляющие силы тяги на трение, затрачиваемые на перемещение плуга в открытой борозде – P_1 , разрушение пласта и его деформацию – P_2 и сообщение пласту суммарной энергии – P_3 ; f – коэффициент сопротивления плуга при протаскивании его в борозде; G – вес плуга; k – коэффициент удельного сопротивления почвы; a, b – размеры пласта почвы; ε – безразмерный коэффициент, зависящий от формы отвала и свойств почвы; n – количество корпусов плуга; v – поступательная скорость плуга.

Во время пахоты сопротивление со стороны плуга через МН передается на трактор.

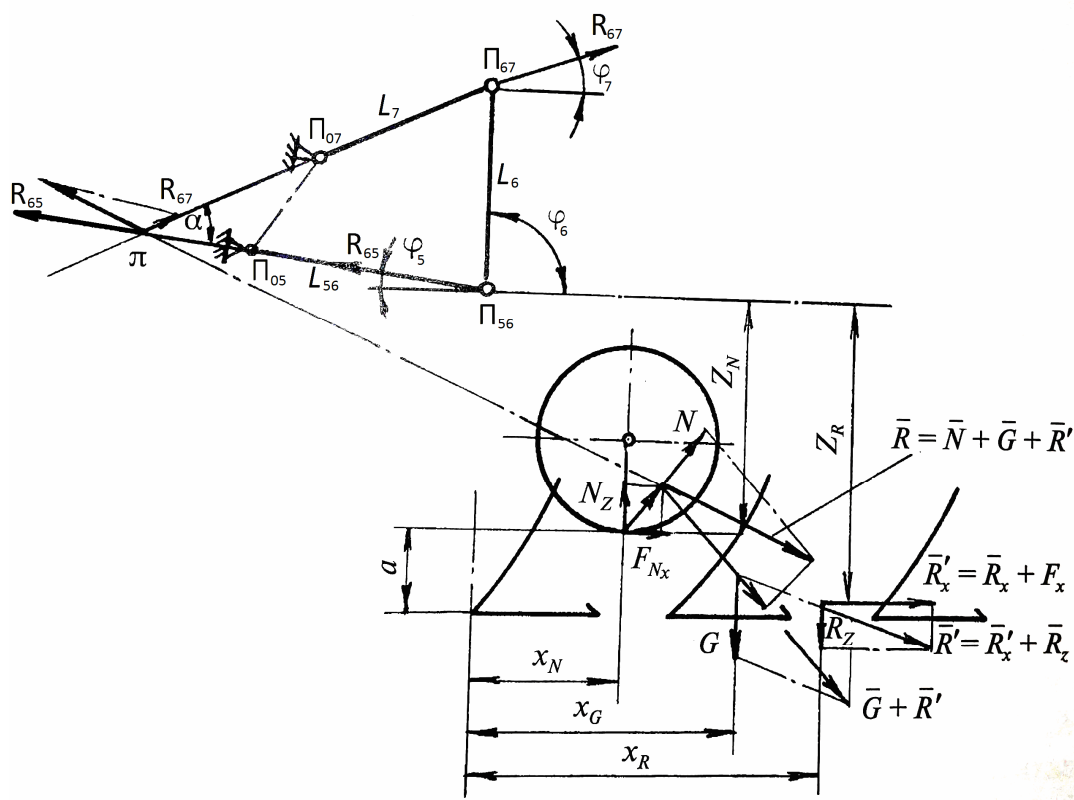


Рис. 1. Схема силового воздействия на плоский аналог внешнего четырехзвенника механизма навески трактора со стороны навесного плуга

Взаимодействие плуга и почвы характеризуется действием следующих сосредоточенных сил: силы сопротивления почвы $\vec{R}' = \vec{R}'_x + \vec{R}'_z$, силы тяжести плуга \vec{G} , силы трения полевых досок о стенку борозды \vec{F}'_x . Взаимодействие почвы и опорного колеса плуга формирует реакцию \vec{N} на ободе опорного колеса. Точки приложения суммарной нагрузки от лемехов плуга и его полевых досок, а также от веса плуга и реакции на колесе предварительно рассчитываются и располагаются, как показано на рис. 1.

Действующие в звеньях МН силы L_{56} и L_{7} раскладываются по компонентам, связанным с осями координат (XOZ):

$$\begin{cases} R_{67}^x = R_{67} \cdot \cos \varphi_7, \\ R_{67}^z = R_{67} \cdot \sin \varphi_7; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_{65}^x = R_{65} \cdot \cos \varphi_5, \\ R_{65}^z = R_{65} \cdot \sin \varphi_5. \end{cases} \quad (3)$$

Условия равновесия сил, действующих на плуг и звенья МН в продольно-вертикальной плоскости, определяются уравнениями проекций на оси OX и OZ и моментом сил, действующим относительно точки Π_{05} (оси подвеса МН). Они представлены системой из трех уравнений (4):

$$\begin{cases} R_{67} \cdot \cos \varphi_7 - 2R_{65} \cdot \cos \varphi_5 + R'_x + F_{N_x} = 0, \\ R_{67} \cdot \sin \varphi_7 + 2R_{65} \cdot \sin \varphi_5 - G + R_z + N_z = 0, \\ R_{67} \cdot \cos \varphi_7 \cdot L_6 + GX_G + R_z X_R - N_z X_N - F_{N_x} Z_N - R'_x Z_R = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где F_{N_x} – сила трения опорного колеса, $F_{N_x} = N_z \mu$; μ – коэффициент перекачивания опорного колеса, коэффициент трения, $\mu = 0,15 - 0,20$; φ_5 и φ_7 , углы образуемые звеньями МН, определяются по методу замкнутого векторного контура [1], [5].

Для решения системы уравнений (3), имеющей три уравнения и три неизвестных, используем метод подстановки. Решая систему уравнений, определяем аналитическое выражение для вертикальной реакции на опорном колесе плуга N_z :

$$N_z = \frac{[(G + R_z) \cos \varphi_5 - R'_x] l_6 \cdot \cos \varphi_1 + (GX_G + R_z x_R - R'_x z_R) \cdot (\sin \varphi_1 \cdot \cos \varphi_5 + \cos \varphi_7)}{(\cos \varphi_5 + \mu) l_6 \cdot \cos \varphi_7 + (x_N + z_N \mu) (\sin \varphi_7 \cdot \cos \varphi_5 + \cos \varphi_7)}. \quad (5)$$

Проанализировав выражение (5), заключаем, что вертикальная реакция на опорном колесе плуга функционально связана с его весом, а также действующими на плуг силами, координатами точек их приложения, параметрами внешнего четырехзвенника МН: углами наклона тяг и высотой присоединенного треугольника:

$$N_z = \text{func}(G, R'_x, R_z \mu; X_N, Z_N, Z_R, X_R, X_G; \varphi_5, \varphi_7, L_6).$$

В результате реакция на опорном колесе плуга определяется как:

$$N = \sqrt{N_z^2 + F_{N_x}^2} = N_z \sqrt{1 + \mu^2}. \quad (6)$$

В качестве примера, выявляющего связь между реакциями на опорном колесе плуга, нагрузками в верхнем и нижнем звеньях МН с одной стороны и сопротивлением плуга с другой, рассмотрим агрегатирование трактора БЕЛАРУС-1523 с плугом пятикорпусным ПЛН 5-35. Результаты анализа представлены на рис. 2–4.

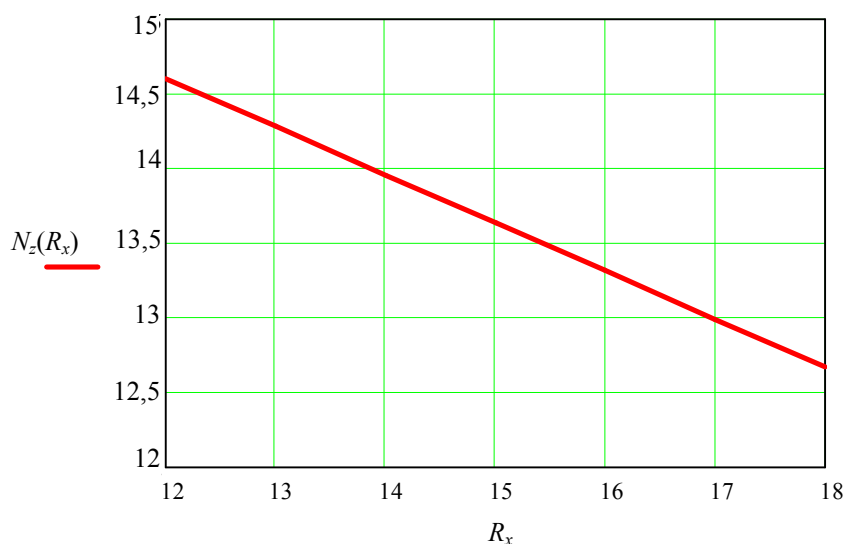


Рис. 2. Связь между сопротивлением со стороны плуга и реакцией на его опорном колесе

При расчете R'_x принимается как сумма от общего сопротивления плуга (1) и силы трения полевых досок о стенку борозды $F_x = 0,3P$:

$$R'_x = P + F_x. \quad (7)$$

Сила вертикального сопротивления R_z , заглубляющая плуг из практики, определяется как:

$$R_z = 0,25R'_x. \quad (8)$$

Сила, действующая в верхней (центральной) тяге L_7 МН из системы уравнений (4), определяется по выражению

$$R_{67} = \frac{(G - R_z) \cos \varphi_5 - R'_x \sin \varphi_5}{\sin(\varphi_5 + \varphi_7)} - \frac{N_z (\cos \varphi_5 + \mu \sin \varphi_5)}{\sin(\varphi_5 + \varphi_7)}. \quad (9)$$

В результате для силы, действующей в верхней тяге L_7 , очевидна зависимость от следующих параметров, представленных ниже:

$$R_{67} = \text{func}(R'_x, N_z, G, R_z, \mu; \varphi_5, \varphi_7).$$

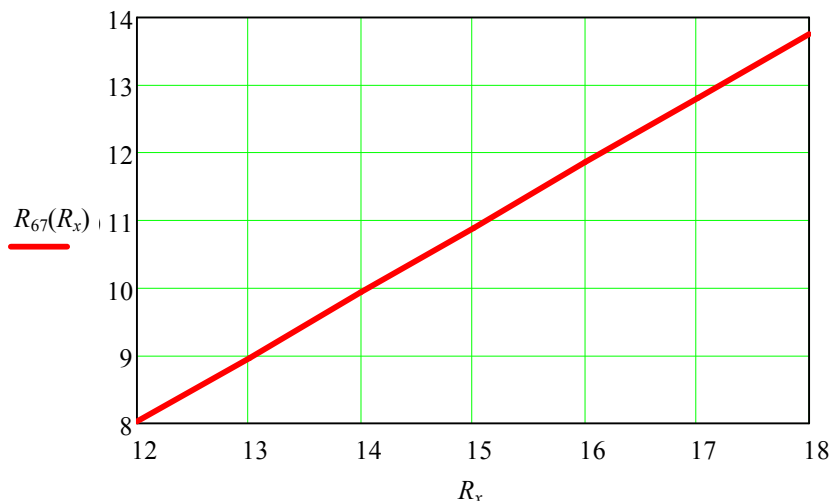


Рис. 3. Связь между сопротивлением со стороны плуга и реакцией в верхней тяге механизма навески

Силы, действующие в нижних тягах, определяются из системы уравнений (4) аналогично полученному выражению (7) по формуле

$$R_{65} = \frac{(G + R_z - R'_x \operatorname{tg} \varphi_5) \cos \varphi_7}{2 \sin(\varphi_5 + \varphi_7)} - \frac{N_z (\cos \varphi_5 + \mu \sin \varphi_5) \cos \varphi_7}{2 \sin(\varphi_5 + \varphi_7) \cos \varphi_5}. \quad (10)$$

Таким образом, для силы, действующей в нижней тяге L_{56} , очевидна зависимость от параметров, представленных ниже:

$$R_{65} = \operatorname{func}(R'_x, N_z, G, R_z, \mu; \varphi_5, \varphi_7).$$

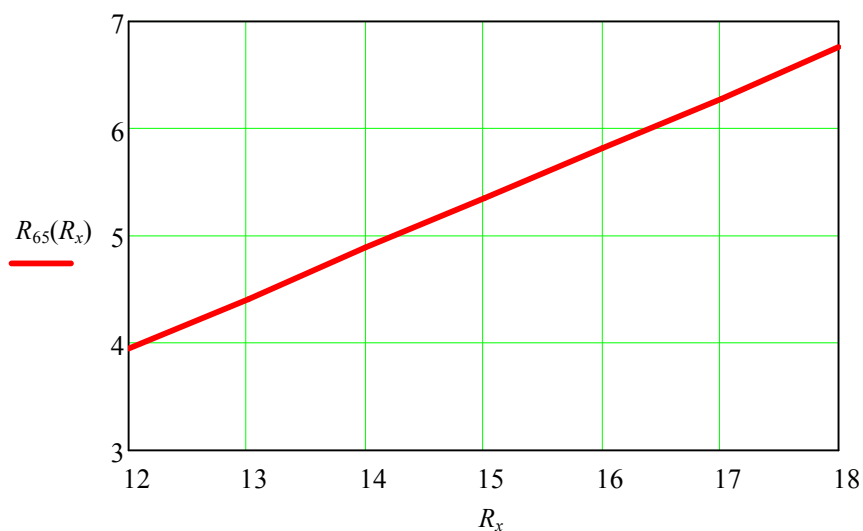


Рис. 4. Связь между сопротивлением со стороны плуга и реакцией в нижней тяге механизма навески

Таким образом, силы, действующие в тягах МН, функционально связаны с реакцией на опорном колесе плуга, а также с действующими на плуг силами, координатами точек их приложения и параметрами внешнего четырехзвенника МН.

Аналитическое определение тяговой нагрузки со стороны плуга

Продлив лучами тяги внешнего четырехзвенника МН (рис. 1), графически определим мгновенный центр вращения π навесного плуга. Перенеся в точку π по линии их действия силы $2R_{65}$ и R_{67} , построим параллелограмм, малая диагональ которого представляет модуль тяговой нагрузки P_T . Его величину определяем по теореме косинусов:

$$R_T = \sqrt{R_{67}^2 + 4R_{65}^2 - 4R_{65}R_{67} \cos \alpha}, \quad (11)$$

где $\alpha = \varphi_5 + \varphi_7$.

Угол β между силами R_T и R_{67} также определяем по теореме косинусов:

$$\beta = a \cos \frac{R_T^2 + R_{67}^2 - 4R_{56}^2}{2R_T R_{67}}.$$

Подставляя в последнюю формулу выражение для R_T из (11), получим:

$$\beta = a \cos \frac{2R_{67}^2 - 4R_{56}R_{67} \cos \alpha}{2R_{67} \sqrt{R_{67}^2 + 4R_{65}^2 - 4R_{65}R_{67} \cos \alpha}}. \quad (12)$$

В результате направление действия силы тяги, компенсирующей действие тяговой нагрузки, определяется как:

$$\varphi_T = \beta + \varphi_7. \quad (13)$$

Из приведенных выражений (11), (12) очевидна связь ориентации силы тяги R_T с силами, действующими в верхней и нижних тягах, а также с их ориентацией.

Заключение

Полученные аналитические выражения позволяют, с одной стороны, рассчитывать тяговое сопротивление со стороны плуга, а с другой – продолжить формализованное описание передачи нагрузки далее по группам Ассур вплоть до рабочих гидроцилиндров МН. Поставленная здесь задача анализа предполагает продолжение в постановке оптимизационного параметрического синтеза МН, что в результате позволит обеспечить рациональную настройку параметров МН для разных вариантов агрегатирования комбинаций, состоящих из тракторов с навесными сельскохозяйственными орудиями.

Предложенная методика анализа нагруженности звеньев внешнего четырехзвенника МН распространяется на решение аналогичной задачи и при автоматизированном проектировании МН различных МТА не только на пахоте, но и при обработке почвы другими сельскохозяйственными орудиями. Эта методика может быть использована при автоматизированном проектировании идентичных по структуре механизмов трехточечной навески лесных тракторов.

Литература

1. Попов, В. Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 251 с. : ил.
2. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков. – М. : Машиностроение, 1977. – 326 с. : ил.
3. Чудаков, Д. А. Основы теории и расчета трактора и автомобиля : учеб. пособие / Д. А. Чудаков. – М. : Колос, 1975. – 384 с.
4. Клочков, А. В. Сельскохозяйственные машины. Теория и расчет / А. В. Клочков, В. Г. Ковалев, П. М. Новицкий. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 439 с.
5. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский – М. : Машиностроение, 1988. – С. 640.

Получено 04.06.2021 г.