

## ОБЩАЯ И ТЯГОВАЯ ДИНАМИКА ПОДРЕССОРЕННОГО ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА С ЗАДНЕНАВЕШЕННЫМ ОРУДИЕМ. КИНЕМАТИКА

Г.С. Горин, докт, техн. наук, профессор (БНТУ)

### Аннотация

*Предложена расчетная схема навесного МТА на базе подрессоренного гусеничного трактора. При расчете малых взаимных перемещений трактора и орудия следует учитывать расположение четырех центров трактора – тяжести, давления ходовой системы, упругости подвески и вращения тяг навесного устройства, а также перемещение опорного колеса сельскохозяйственного орудия по неровности рельефа. Получено уравнение связи малых взаимных продольно-угловых перемещений трактора и навесного сельскохозяйственного орудия. При регулировке горизонтальности рамы сельскохозяйственного орудия в рабочем положении следует учитывать дифференциал корпуса трактора в статике.*

*The design scheme implements the MTA-based cushioning crawler tractor is proposed. In the calculation of small mutual movements of the tractor and machine should consider the location of the four centers of the tractor - gravity, pressure, running gear, suspension and elastic rotation rod attachment and movement of agricultural implements support wheel on uneven terrain. The equation of constraint of the mutual connection of small longitudinal angular movements of tractor and mounted agricultural implements is obtained. When adjusting the horizontal position of the implement frame in position to consider the trim in the static structure of the tractor.*

### Введение

Взаимодействие трактора с навесным орудием рассмотрено в учебниках по теории трактора при следующих упрощающих предпосылках:

- отсутствие взаимных перемещений трактора и сельхозорудия;
- движение осуществляется по ровной недеформируемой поверхности.

Эти допущения некорректны для сельскохозяйственных МТА на базе колесных, а особенно гусеничных тракторов, как правило, имеющих подвеску и меньшую продольную базу. Исследования последних лет [1-4] показали, что малые взаимные перемещения колесного трактора и сельхозорудия также существенно влияют на общую и тяговую динамику МТА.

### Основная часть

#### Расчетная схема

Рассмотрим общий случай установившегося движения навесного МТА по наклонной опорной поверхности под углом  $\alpha$  к горизонтали (рис.1).

К трактору приложим:

- силу веса  $G_T$  в центре тяжести на расстоянии  $a_0$  от середины опорной поверхности гусеницы на высоте  $h_{ум}$

$$G_T = G_T^H + G_T^H,$$

где  $G_T^H$  и  $G_T^H$  – составляющие веса трактора, соответственно, подрессоренного и неподрессоренного;

- силу сопротивления перекатыванию  $P_f$

$$P_f = P_f^H + P_f^K,$$

где  $P_f^H$  и  $P_f^K$  – составляющие силы сопротивления,

возникающие, соответственно, в результате перематывания гусеницы и колееобразования;

- главный вектор и главный момент внешних сил, возникающих при взаимодействии трактора с навесным орудием;

- нормальные реакции:  $N_j^1$  – приложенные к  $j$  – опорным каткам;

$N_j$  – приложенные к  $j$  – рессорам (за вычетом неподрессоренных масс).

К навесному орудью приложим:

- силу  $R_x^0$  тягового сопротивления, приложенную в центре тяжести орудия, на расстоянии  $a_{пл}$  от оси подвеса т. В;

– его вертикальную составляющую  $R_x^0 \text{tg} \theta$ , включающую силу веса орудия;

- нормальную реакцию  $V_H$ , приложенную в контакте опорного колеса навесного орудия с почвой на продольном расстоянии  $l_{пл}$  от оси подвеса;

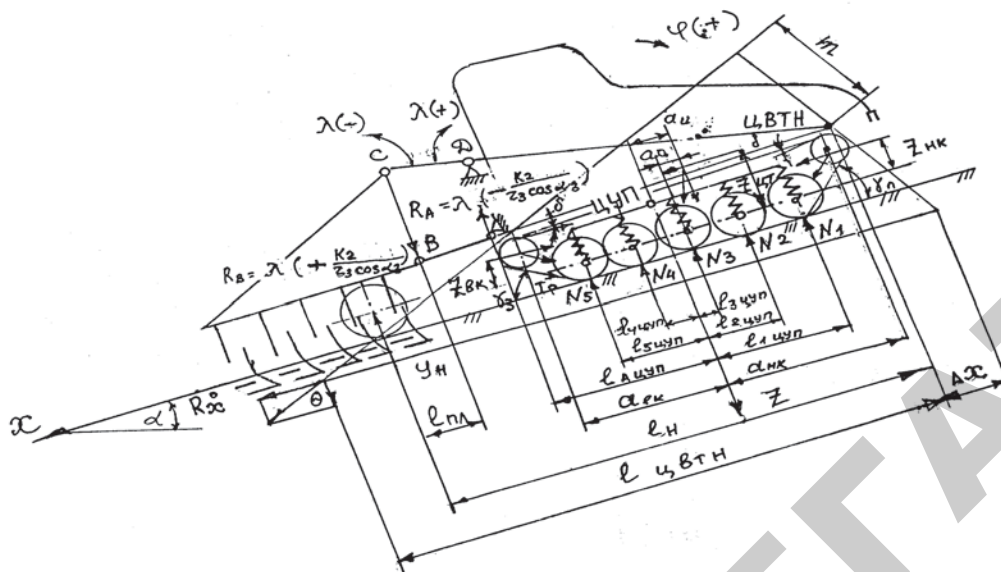


Рисунок 1. Схема к расчету тяговой и общей динамики МТА

– главный вектор и главный момент внешних сил, передаваемые навесным устройством (НУ) при взаимодействии с орудием.

При дифференте (повороте) на угол  $\varphi$  назад корпус трактора сжимает верхнюю тягу НУ, вдавливая в почву опорное колесо на величину  $\Delta q_{пл}$  и поворачивает корпус орудия на угол  $\psi$  (рис. 2). Данная задача является статически неопределимой [1]. Ее будем решать, используя метод Лагранжа для системы с избыточными координатами.

Будем различать следующие четыре центра:

**Центр тяжести (ЦТ)** – точка, в которой приложена равнодействующая сил веса. У реально выполненных сельскохозяйственных тракторов ЦТ смещают вперед от середины опорной поверхности гусени-

цы на расстояние  $a_0 = (0,05...0,08)L_{гус}$ .

**Центр давления (ЦД)** – точка, в которой приложена равнодействующая нормальных реакций почвы, возникающих в контактах опорной поверхности гусеницы с почвой. Продольная координата  $x_0$  ЦД отсчитывается от середины опорной поверхности гусеницы.

В статике  $a_0 = x_0$ . При движении  $x_0$  ЦД смещается назад и не совпадает с координатой  $a_0$ . Идеальным считается расположение ЦД, когда  $x_0 = 0$ , т.к. при этом минимальные потери на колеобразование, а поэтому толкающая реакция почвы (сила тяги) – максимальная.

Коэффициентом смещения ЦД называют отношение

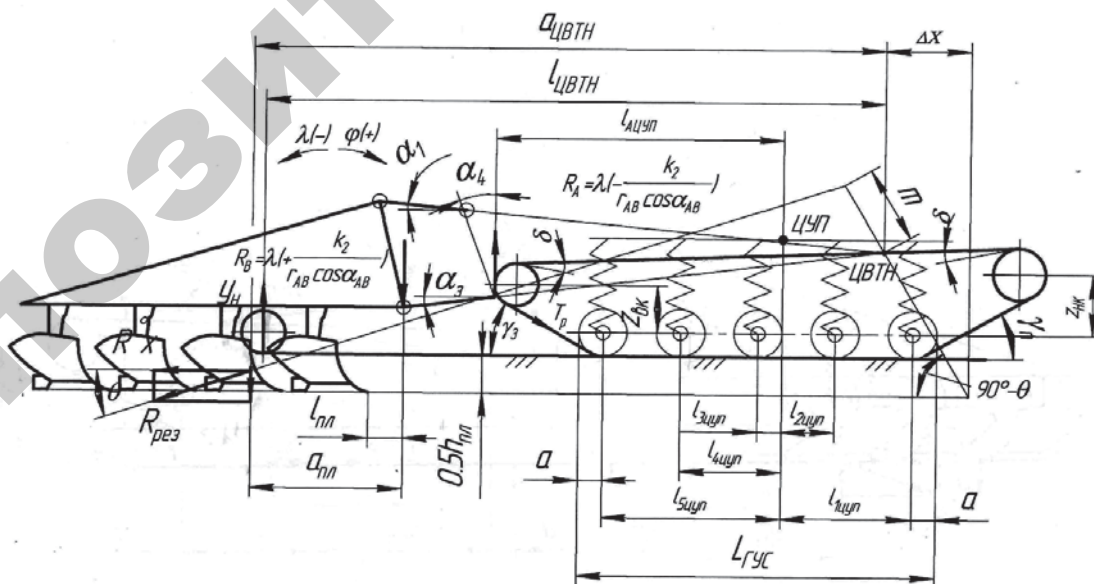


Рисунок 2. Схема к выводу уравнений связи и равновесия сельхозорудия

$$g_d = x_d / L_{TVC},$$

– если  $g_d = \frac{1}{6}$ , эпора нормальных давлений вырождается в треугольную;

– если  $g_d > +\frac{1}{6}$  – задняя, часть длины гусеницы, не передает нормальную нагрузку;

– если  $g_d < -\frac{1}{6}$  – не передает нормальную нагрузку передняя часть гусеницы.

**Центр упругости подвески (ЦУП)** – точка, при повороте вокруг которой

$$c_j l_{jЦУП} = 0,$$

где  $l_{jЦУП}$  – расстояния от  $j$  – рессор до ЦУП;  $c_j$  – жесткости  $j$  – рессоры:

$$c_j = \frac{N_j}{f_j},$$

где  $f_j$  – ход подвески  $j$  – катка.

В случае симметричной подвески ЦУП совпадает с центром тяжести и угол дифферента трактора в статике  $\varphi = 0$ . В несимметричной подвеске ЦУП смещен от ЦТ на продольное расстояние:

$$a_y = \frac{\sum_{j=1}^{2n} c_j l_j}{\sum_{j=1}^{2n} c_j},$$

где  $l_j$  – расстояния от ЦТ до осей  $j$  – катков.

В несимметричной подвеске вертикальные перемещения ЦТ вызывают поворот корпуса, а его угловые отклонения сопровождаются вертикальным перемещением ЦТ.

**Центр вращения тяг навесного устройства**

(ЦВТН) – точка пересечения в продольной плоскости осей верхней и нижних тяг. Изменяя положение ЦВТН, например, путем перестановки точки  $D$  (рис. 3) крепления верхней тяги на тракторе, можно изменять продольную координату  $l_{ЦВТН}$  – расстояние до оси опорного колеса навесной машины. Чем больше  $l_{ЦВТН}$ , тем меньше влияют на нормальную нагрузку  $N_H$  относительные перемещения трактора и сельхозорудия.

Рассмотрим малые продольно-угловые перемещения трактора в следующих координатах:

$Z$  – вертикальные перемещения ЦУП,  $\varphi$  – угол дифферента корпуса.

Продольно-угловые перемещения навесного орудия рассматриваются в координатах:

$q_{nl}$  – вертикальные опорного колеса, причем, будем обозначать через  $q_{nl}^0$  при движении без деформации почвы, а через  $\Delta q_{nl}$  – дополнительные деформации неровности;

$\psi$  – угол поворота рамы сельхозорудия вокруг оси опорного колеса.

Начало оси координат приложим в точке пересечения опорной поверхности с нормалью, проведенной из ЦУП.

Примем следующие правила знаков:

перемещения ЦУП трактора  $Z$  и опорного колеса сельхозорудия  $q_{nl}$ :

– положительными  $Z(+)$  и  $q(+)$  – направленные вниз;

– отрицательными  $Z(-)$  и  $q(-)$  – направленные вверх.

Угловые перемещения:

– положительные  $\varphi(+)$  и  $\psi(+)$  – если передняя часть трактора и орудия движется вниз, а задняя – вверх;

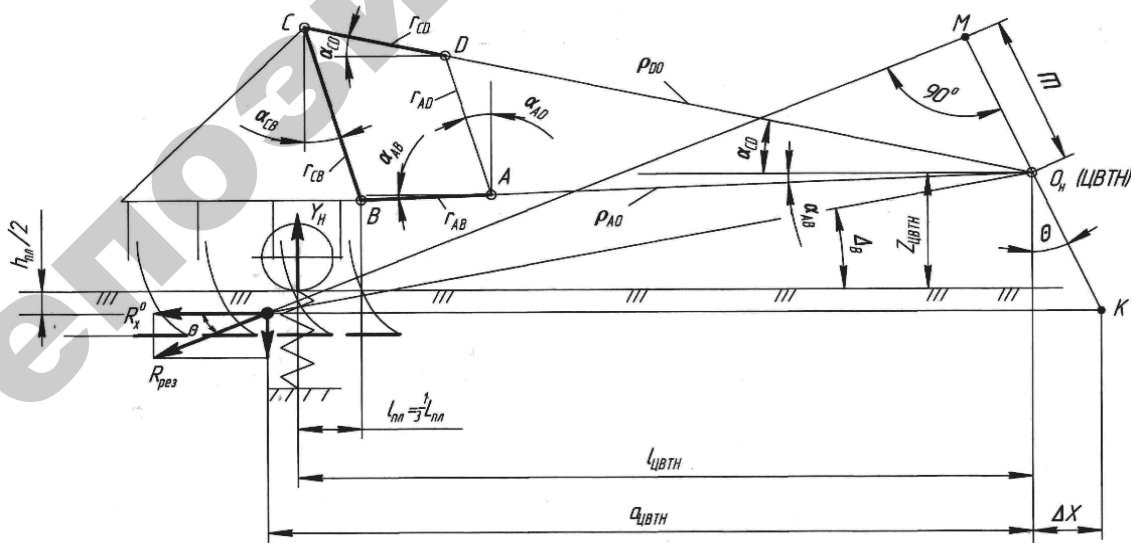


Рисунок 3. Схема ЗНУ

– отрицательные  $\varphi(-)$  и  $\psi(-)$  – если передняя часть трактора и орудия движется вверх, а задняя вниз.

Расстояния  $l_{j \text{ ЦУП}}$  от ЦУП до катков:

– положительны  $l_{j \text{ ЦУП}}$ , направленные вперед;

– отрицательны  $l_{j \text{ ЦУП}}$ , направленные назад.

Положительны силы веса и реакции, направленные вниз.

**Уравнение связи перемещений трактора и задненавесного сельхозорудия**

Обозначим длины тяг и стойки механизма  $r_i$  углы их наклона  $\alpha_i$  (рис. 3), соответственно:

$r_{AB} = r_3$  и  $\alpha_{AB} = \alpha_3$  – нижней тяги  $AB$ ;

$r_{DC} = r_1$  и  $\alpha_{DC} = \alpha_1$  – верхней тяги  $CD$ ;

$r_{BC} = r_2$  и  $\alpha_{BC} = \alpha_2$  – стойки  $BC$ ;

Обозначим также через  $r_{AD} = r_4$  длину отрезка  $DA$ , соединяющего шарниры крепления тяг НУ на тракторе, а через  $\alpha_{AD} = \alpha_4$  – угол его наклона к нормали.

В соответствии с рис. 3:

$$\left. \begin{aligned} r_{AD} \cos \alpha_{AD} + r_{DC} \sin \alpha_{DC} &= r_{BC} \cos \alpha_{BC} + r_{AB} \sin \alpha_{AB} \\ r_{AD} \sin \alpha_{AD} + r_{DC} \cos \alpha_{DC} &= r_{BC} \sin \alpha_{BC} + r_{AB} \cos \alpha_{AB} \end{aligned} \right\}, (1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{AD} = \frac{r_{BC} \sin \alpha_{BC} + r_{AB} \cos \alpha_{AB} - r_{DC} \cos \alpha_{DC}}{r_{BC} \cos \alpha_{BC} + r_{AB} \sin \alpha_{AB} - r_{DC} \sin \alpha_{DC}}. (2)$$

Полагая, что приращения углов  $\alpha_{BC}$  и  $\alpha_{AD}$  равны малым углам дифферента, соответственно  $\varphi$  и  $\psi$ , продифференцируем приведенные уравнения (1)

$$d\alpha_{AD} = \varphi,$$

$$d\alpha_{BC} = \psi.$$

$$\left. \begin{aligned} -r_{AD} \sin \alpha_{AD} d\alpha_{AD} + r_{DC} \cos \alpha_{DC} d\alpha_{DC} &= \\ = -r_{BC} \sin \alpha_{BC} d\alpha_{BC} + r_{AB} \cos \alpha_{AB} d\alpha_{AB} \\ r_{AD} \cos \alpha_{AD} d\alpha_{AD} + r_{DC} \sin \alpha_{DC} d\alpha_{DC} &= \\ = -r_{BC} \cos \alpha_{BC} d\alpha_{BC} + r_{AB} \sin \alpha_{AB} d\alpha_{AB} \end{aligned} \right\}, (3)$$

где  $d\alpha_{AB}$  – изменение угла наклона нижней тяги  $AB$  НУ.

Пусть также

$$K_1 = \frac{r_{BC} \cos(\alpha_{DC} + \alpha_{BC})}{r_{AD} \cos(\alpha_{DC} + \alpha_{AD})},$$

$$K_2 = \frac{r_{AB} \sin(\alpha_{DC} - \alpha_{AB})}{r_{AD} \cos(\alpha_{DC} + \alpha_{AD})}.$$

Тогда исключив из системы уравнений (3) члены, содержащие  $d\alpha_{DC}$ , запишем выражение

$$\varphi = K_1 \psi + K_2 d\alpha_{AB}. (4)$$

Если колесо навесного орудия движется со смятием почвы без отрыва от поверхности поля

$$d\alpha_{AB} = \frac{(z - \varphi l_{A \text{ ЦУП}}) - (q_{\text{пл}} + \psi l_{\text{пл}})}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}. (5)$$

Подставив выражение (5) для  $d\alpha_{AB}$  в предыдущую формулу(4), получим уравнение связи перемещений корпуса трактора и сельхозорудия

$$f(z, \varphi, q, \psi) = -K_2 \frac{z - q_{\text{пл}}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}} + \varphi \left( 1 + \frac{K_2 l_{A \text{ ЦУП}}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}} \right) - \psi \left( K_1 - \frac{K_2 l_{\text{пл}}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}} \right) = 0. (6)$$

Здесь продольные расстояния:

$l_{A \text{ ЦУП}}$  – от ЦУП до переднего шарнира нижней тяги НУ (точка А);

$l_{\text{пл}}$  – от заднего шарнира нижней тяги (точка В) до опорного колеса сельхозорудия.

Из рис. 3. по теореме синусов из треугольника  $\triangle ADO_{\text{ЦВТН}}$  получено выражение

$$\frac{r_{AD}}{\sin(\alpha_{DC} + \alpha_{AB})} = \frac{\rho_{AO}}{\sin(90^\circ - \alpha_{DC} - \alpha_{AD})} = \frac{\rho_{AO}}{\cos(\alpha_{DC} + \alpha_{AD})}. (7)$$

Откуда

$$\frac{1}{\rho_{AO}} = \frac{\sin(\alpha_{DC} - \alpha_{AB})}{r_{AD} \cos(\alpha_{DC} + \alpha_{AD})}.$$

Преобразуем выражение (7)

$$\frac{K_2}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}} = \frac{\sin(\alpha_{DC} - \alpha_{AB})}{r_{AD} \cos(\alpha_{DC} + \alpha_{AD}) \cos \alpha_{AB}} = \frac{1}{\rho_{AO} \cos \alpha_{AB}}.$$

Расстояние  $\rho_{AO}$  – от точки А до ЦВТН.

Тогда уравнение связи приобретает следующий вид

$$f(\varphi, \psi, z_{\text{ЦУП}}, q_{\text{пл}}) = \varphi \left( 1 + \frac{l_{A \text{ ЦУП}}}{\rho_{AO} \cos \alpha_{AB}} \right) - \psi \left( K_1 - \frac{l_{\text{пл}}}{\rho_{AO} \cos \alpha_{AB}} \right) + \frac{q_{\text{пл}} - z_{\text{ЦУП}}}{\rho_{AO} \cos \alpha_{AB}} = 0. (8)$$

### Анализ уравнения связи

Выделив члены, содержащие  $\rho_{AO} \cos \alpha_{AB}$ , уравнение связи (8) перепишем в следующем виде:

$$-(z - q_{nl}) - l_{A \text{ ЦУП}} \varphi + l_{nl} \psi = \rho_{AO} \cos \alpha_{AB} (\psi K_1 - \varphi).$$

В статике ( $P_{KP} = 0, V = 0$ ) корпус трактора приобретает некоторые начальные перемещения ЦУП и дифферент:  $z = z^0; -\varphi = \varphi^0$ .

Поворот рамы сельхозорудия вызывает неравномерность глубины почвообработки по длине сельхозорудия:  $\Delta h_{nl} = L_{nl} \sin \psi$ . Регулировку горизонтальности и глубины пахоты орудия производят в статике, устанавливая горизонтально ( $\psi^0 = 0$ ) раму. При статическом дифференте  $\varphi^0 \neq 0, \varphi^0 = 0$ .

Тогда

$$q_{nl}^0 = z^0 - \varphi^0 (\rho_{AO} \cos \alpha_{AB} - l_{A \text{ ЦУП}}). \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что в рабочем положении при дифференте трактора  $\varphi \neq \varphi^0$ , корпус орудия получит дифферент  $\psi^0$  назад:

Если  $z^0 = 0$  и  $\varphi^0(+)$  и  $(\rho_{AO} \cos \alpha_{AB} - l_{A \text{ ЦУП}}) > 0$ , то  $\Delta q_{nl}^0 < 0$  колесо навесного орудия разгружается.

Если  $z^0 = 0$ ,  $\varphi^0(-)$  и  $(\rho_{AO} \cos \alpha_{AB} - l_{A \text{ ЦУП}}) < 0$ , то  $\Delta q_{nl}^0 > 0$  колесо навесного орудия догружается.

Если  $\rho_{AO} \cos \alpha_{AB} \approx l_{A \text{ ЦУП}}$ , т.е. ЦВТН совпадает с ЦУП, то угловые перемещения корпуса трактора не вызывают поворот корпуса сельхозорудия.

Если  $\psi = 0$ , уравнение связи в статике запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} z^0 - \varphi^0 \frac{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}{K_2} \left(1 + \frac{K_2 l_{A \text{ ЦУП}}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}\right) = \\ = z^0 - \varphi^0 \left(\frac{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}{K_2} - l_{A \text{ ЦУП}}\right) - \\ - (q_{nl} - \Delta q_{nl}) = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Для того чтобы в рабочем положении при движении с тяговой нагрузкой дифферент трактора и сельхозорудия стал равным  $\varphi = 0, \psi = 0$  в статике путем регулировки длины верхней тяги НУ корпус сельхозорудия рекомендуется повернуть вокруг оси опорного колеса на угол  $\psi^0$

$$\psi^0 = \frac{\varphi^0 \left(1 + \frac{K_2 l_{A \text{ ЦУП}}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}\right) - \frac{K_2 (z_{cm}^0 - q_{nl}^0)}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}}{K_1 - \frac{K_2 l_{nl}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}}. \quad (11)$$

С учетом начальных условий ( $\varphi^0$  и  $\psi^0$ ) перепишем уравнение (10) в следующем виде:

$$\begin{aligned} -K_2 \frac{z - q_{nl}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}} + \\ + (\varphi - \varphi^0) \left(1 + \frac{K_2 l_{A \text{ ЦУП}}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}\right) - \\ - (\psi - \psi^0) \left(K_1 - \frac{K_2 l_{nl}}{r_{AB} \cos \alpha_{AB}}\right) = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Для расчета общей динамики навесного МТА следует определить пять неизвестных: перемещение по нормали, проведенной из ЦУП  $Z$ , угол дифферента  $\varphi$ , деформацию почвы под опорным колесом орудия  $\Delta q_{nl}$ , угол дифферента орудия  $\psi$  и  $\lambda$ . Всего необходимо получить пять уравнений. Одно из них – уравнение связи перемещений трактора и сельхозорудия.

### Выводы

1. Взаимодействие подрессоренного гусеничного трактора с задненавесенным орудием рассмотрено с учетом их малых взаимных перемещений, возникающих при копировании неровностей рельефа и деформаций рессор подвески и почвы. Получено уравнение связи этих перемещений.

2. Из анализа уравнения связи следует, что в статике горизонтальность рамы сельхозорудия следует регулировать исходя из формулы (11).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Анилович, В.Я. Основы статистической теории линейных колебаний скоростных машинно-тракторных агрегатов / В.Я. Анилович // Труды ВИМ, т. 37. – М.: ВИМ, 1965.
2. Горин, Г.С. Исследования и обоснование типа подвески гусеничного скоростного трактора класса 3: дис. ...канд. техн. наук: 05.05.03 / Г.С. Горин; ЦНИИМЭСХ Неч. Зоны СССР. – Минск. – 1970. – 185 л.
3. Горин, Г.С. Уравновешивание эшелонированного пахотного агрегата на базе гусеничного трактора в продольно-вертикальной плоскости / Г.С. Горин, А.В. Ващула // Вес. НАН Беларуси: сер. аграр. наук, 2008. – № 1. – С. 89-95.
4. Горин, Г.С. Влияние малых взаимных перемещений трактора и полунавесного прицепного сельхозорудия на тяговую и общую динамику их взаимодействия / Г.С. Горин, А. В. Захаров, А.В. Ващула // Вес. НАН Беларуси: сер. аграрн. наук, 2008. – №2. – С. 105-112.