

Ю.А. Добрынин, А.В. Андронов, И.А. Зверев

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ КОМПОНОВКИ ТРЕЛЕВОЧНОГО ТРАКТОРА С КОЛЕСНОЙ ФОРМУЛОЙ 4К4

Введение. При проектировании и создании лесных машин особое значение имеет обоснование компоновочных параметров, влияющих на конструктивные особенности, которые непосредственно связаны с производственными задачами применения.

Особенность компоновки трелёвочного трактора с колесной формулой 4К4 с одинаковыми колесами определяется его основной производственной функцией, связанной с трелевкой заготовленной древесины. При этом задняя часть корпуса трактора предназначена для размещения части пачки хлыстов или деревьев, что позволяет обеспечить примерное равенство распределения нагрузки на переднюю и заднюю части трактора в процессе грузового хода.

Холостой ход трактора (движение без груза) сопровождается неравномерностью распределения нагрузок на опоры трактора, когда передняя часть, в связи с особенностью компоновки, существенно тяжелее задней части. Обычно оценка компоновки колёсных машин определяется по коэффициенту неравномерности распределения нагрузок на задние и передние оси по формуле [Орлов, 1963; Помогаев, 1973].

$$K_n^{\text{полн}} = \frac{Z_{\text{max}}^{\text{полн}}}{Z_{\text{min}}^{\text{полн}}}, \quad (1)$$

где $Z_{\text{max}}^{\text{полн}}$, $Z_{\text{min}}^{\text{полн}}$ – максимальное и минимальное значения суммарного давления на опорную поверхность под колёсами передней и задней частями машины.

Допустимым значением коэффициента неравномерности принято считать $K_n^{\text{полн}} < 2$, что достигается рациональной компоновкой технологического оборудования и смещением центра тяжести машины. Его значение устанавливается в статическом положении путём определения давления под передними и задними колёсами при взвешивании трактора.

Цели и задачи. Установить изменение значения коэффициента неравномерности распределения нагрузок (1) в процессе движения трактора без

груза, представляющего собой динамическую систему, в которой массы трактора (передняя и задняя) опираются на упругие элементы – пневматические шины, в которых присутствуют силы неупругого сопротивления, обеспечивающие весьма слабое, но подлежащее учету в расчетных схемах демпфирование возникающих колебаний.

Методика исследования. Для рассмотрения такой постановки задачи выберем, в первом приближении, линейную динамическую модель, эквивалентную трелёвочному колесному трактору (рис. 1), предполагая, что она обеспечит достоверную, качественную физическую картину вертикальных колебаний передней и задней частей трактора. При этом будем иметь в виду, что коэффициент распределения масс трактора, колеблющихся на пневматических шинах находится в пределах $0,8 \div 1,2$, а это допускает возможность рассматривать колебания его передней и задней частей, при езде по неровностям микропрофиля, как независимые [Ротенберг, 1973].

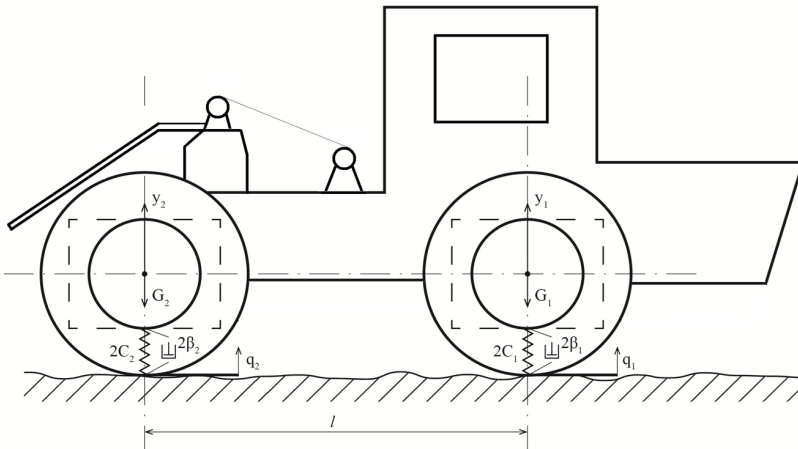


Рис. 1. Расчетная схема вертикальных колебаний трелевочного трактора с колесной формулой 4К4

Fig. 1. Calculation scheme of vertical oscillations of a skidder with a wheel arrangement 4K4

На расчетной схеме (рис. 1) обозначены:

$G_1 = m_1g$ – вес передней части (m_1 – масса передней части);

$G_2 = m_2g$ – вес задней части (m_2 – масса задней части);

g – ускорение свободного падения;

l – база трактора;

y_1, y_2 – вертикальные перемещения передней и задней масс трактора, соответственно;

q_1, q_2 – возмущение от неровностей микропрофиля пути под передними и задними колесами, соответственно;

$2c_1, 2c_2$ – коэффициенты жесткости передних и задних пневматических шин, соответственно;

$2\beta_1, 2\beta_2$ – параметры неупругого сопротивления в передних и задних пневматических шинах, соответственно.

При составлении дифференциальных уравнений вертикальных колебаний передней и задней частей трактора приняты следующие допущения:

- упругие характеристики пневматических шин линейные;
- силы неупругого сопротивления в шинах пропорциональны скорости;
- контакт колес с опорной поверхностью пути точечный, а движение колес по неровностям микропрофиля пути безотрывное;
- микропрофиль пути под левыми и правыми колесами одинаковый;
- движение трактора прямолинейное, а коэффициент сопротивления движению постоянный, движущие силы не учитываются.

Согласно принципу Даламбера [Цзе, Морзе, Хинкл, 1966], дифференциальное уравнение вертикальных колебаний, определяющее изменение нагрузок на опоры трактора в движении, примет вид:

$$m_j \ddot{y}_j + 2\beta_j (\dot{y}_j - \dot{q}_j) + 2c_j (y_j - q_j) = 0, \quad j = 1, 2. \quad (2)$$

Возмущение от неровностей микропрофиля пути q_j носит случайный характер, что соответственно определяет случайный характер колебаний нагрузок на опоры трактора в движении.

Статистические характеристики микропрофиля пути, в нашем случае служащие «входом» в колебательную систему, одинаковые для передней и задней части трактора и они известны для лесных дорог, трелевочных волоков [Добрынин, 1973; Рыскин, 1970; Силуков, 1973], в виде корреляционных функций и соответствующих им спектральных плотностей. В качестве «выхода» из колебательной системы, описываемой дифференциальными уравнениями (2), обычно рассматривают координаты y_1 и y_2 , при этом передаточная функция в комплексном виде представляется следующим выражением [Добрынин, 1973]:

$$W_{y_j}(\kappa_j) = \frac{1 + i2\psi\kappa_j}{1 - \kappa_j^2 + i2\psi\kappa_j}, \quad j = 1, 2. \quad (3)$$

Здесь параметр ψ представляет собой относительный коэффициент затухания в шинах, в долях от критической величины, принятый одинаковым для передних и задних шин в силу незначительного их отличия (его значение представлено в таблице), а параметр κ представляет собой отношение частоты вынужденных ω к частоте собственных парциальных колебаний передней и задней частей трактора v_1 и v_2 , соответственно

$$\kappa_1 = \frac{\omega}{v_1}, \quad \kappa_2 = \frac{\omega}{v_2}. \quad (4)$$

Поскольку коэффициенты жесткости передних и задних шин, как правило, одинаковые ($c_1 = c_2$), то

$$v_1^2 = \frac{2c}{m_1}, \quad v_2^2 = \frac{2c}{m_2}. \quad (5)$$

Как видно из рис. 1, изменение нагрузки на передние и задние опоры трактора непосредственно связано с деформацией шин, поэтому очень важно учитывать передаточную функцию «по выходу» в виде «динамической прогиб шин» $W_j(i\omega)$, которая определяется как разница передаточной функции перемещений масс трактора и единицы:

$$W_{jj}(i\omega) = W_{yj}(i\omega) - 1, \quad j = 1, 2. \quad (6)$$

После преобразований выражений (3) и (6) получим модули передаточных функций по «выходу» в виде динамического прогиба передних и задних шин

$$\left| W_{f_1(i\omega)} \right| = \frac{\omega^2}{\sqrt{(v_1^2 - \omega^2)^2 + 4v_1^2 \psi^2 \omega^2}}, \quad \left| W_{f_2(i\omega)} \right| = \frac{\omega^2}{\sqrt{(v_2^2 - \omega^2)^2 + 4v_2^2 \psi^2 \omega^2}}. \quad (7)$$

Модули передаточных функций (7) характеризуют изменение нагрузок на опоры трактора в зависимости от частоты воздействия со стороны «входа» в динамическую систему от микропрофиля пути, то есть в процессе движения трактора. А это позволяет рассматривать отношение модулей передаточных функций (7) как коэффициент неравномерности распределения нагрузок на опоры трактора в движении

$$K_{\text{нд}}(\omega) = \frac{\left| W_{f_1(i\omega)} \right|}{\left| W_{f_2(i\omega)} \right|} = \sqrt{\frac{(v_2^2 - \omega^2)^2 + 4v_2^2 \psi^2 \omega^2}{(v_1^2 - \omega^2)^2 + 4v_1^2 \psi^2 \omega^2}}. \quad (8)$$

Результаты и обсуждение исследований. На рис. 2 представлены зависимости изменения коэффициента неравномерности распределения вертикальных нагрузок на опорах трактора от частоты воздействия со стороны неровностей микропрофиля пути в процессе движения трактора, параметры динамической системы которого представлены в таблице.

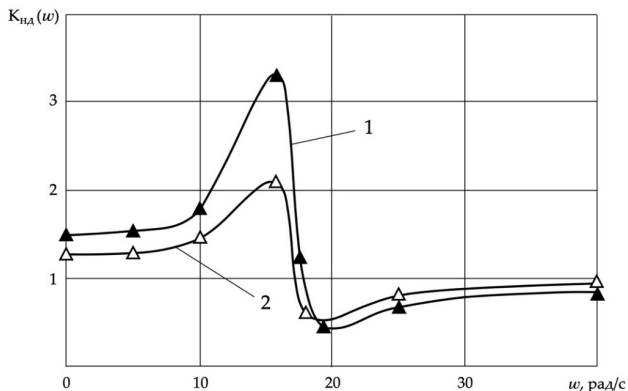


Рис. 2. Зависимость $K_{нд}(\omega)$ от частоты воздействия:
 1 – частота $\nu_1 = 15,9$ рад./с, $\nu_2 = 19,3$ рад./с; 2 – частота $\nu_1 = 15,9$ рад./с,
 $\nu_2 = 18$ рад./с ($G_2 = 26,3$ кН)

Fig. 2. The dependence of the $K_{нд}(\omega)$ on the frequency of exposure

Параметры динамической системы при движении трактора

Parameters of the dynamic system when the tractor is moving

Наименование параметра	Обозначение	Величина параметра
Эксплуатационный вес трактора Т-80Л, кН	G	56,5
Вес приходящийся на колеса, кН:		
– передние	G_1	33,9
– задние	G_2	22,6
База трактора, м	l	2,54
Коэффициент жесткости шин, Н/м	$2c$	857×10^3
Относительный коэффициент затухания в шинах, б/р	ψ	$0,083 \div 0,09$

Анализ выражения (8) показывает, что при частоте внешнего воздействия равной нулю ($\omega = 0$), коэффициент неравномерности распределения нагрузок будет соответствовать статическому положению трактора, что соответствует выражению (1):

$$K_n(\omega) = \frac{v_2^2}{v_1^2} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{G_1}{G_2}. \quad (9)$$

Для рассматриваемого в качестве примера опытного образца трактора с параметрами, представленными в таблице, этот коэффициент будет иметь значение:

$$K_H = \frac{33,9}{22,6} = 1,5. \quad (10)$$

С этого значения начинается построение, зависимости по выражению (8), представленной на рис. 2 (кривая – 1). Здесь же для сравнительного анализа представлена кривая – 2, когда заднюю часть трактора загрузили ($G_2 = 26,3$ кН $K_H = G_1/G_2 = 33,9/26,23 = 1,29$), и частота собственных парциальных колебаний изменилась и составила $v_2 = 18$ рад/с.

При равенстве собственных частот передней и задней частей трактора, когда имеет место динамическая и статическая симметрия [Ротенберг, 1973; Добрынин, 1973], что соответствует рациональной компоновке трактора, $K_{нд}(\omega)$ во всем диапазоне частот воздействия от микропрофиля пути равен единице.

Следует отметить, что при стремлении сблизить частоты собственных колебаний передней и задней частей трактора при их незначительном расхождении и при имеющих место слабых демпфирующих способностях пневматических шин, возникает особенность колебаний корпуса трактора с возникновением явления биений [Добрынин, 2020], которые ощутимо проявляют себя на скоростях движения трактора более 10 км/ч и отрицательно отражаются на его плавности хода.

Из выражения (8) видно, что $K'_{нд}(\omega)$ включает в себя основные параметры трактора как динамической системы, а отношение модулей передаточных функций по «выходу» динамический прогиб шин характеризует компоновку и может использоваться как дополнительная оценка компоновочных параметров трактора в процессе движения, что имеет значение также при изучении показателей устойчивости, управляемости и плавности хода, непосредственно влияющих на его эксплуатационные характеристики.

Из рис. 2 видно, что в процессе движения трактора коэффициент неравномерности нагрузок существенно отличается от статического случая ($K_H^{полн} < 2$) и может превышать его в первой резонансной зоне в несколько раз.

Его снижение зависит от параметров колебательных систем передней и задней частей трактора и особенно зависит от демпфирующих способностей пневматических шин, параметры неупругого сопротивления которых весьма ограничены. Повышение демпфирующих способностей колебательных си-

стем передней и задней частей трактора возможно введением в ходовую систему трактора подрессоривания с гидравлическими гасителями колебаний.

Заключение. Полученный в результате проведенного исследования коэффициент неравномерности распределения нагрузок на опоры трелёвочного трактора с колёсной формулой 4К4 в процессе его движения дополняет существующую оценку компоновки для статического случая [Орлов, 1963; Помогаев, 1973] и указывает на возможные пути совершенствования конструктивных параметров трактора, обеспечивающих его рациональную компоновку. Применение этого коэффициента возможно и для других транспортных средств различного назначения.

Библиографический список

Добрынин Ю.А. Исследование вертикальной динамики колесного трактора на трелевке леса в условиях рубок промежуточного пользования. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛТА, 1973. 205 с.

Добрынин Ю.А., Кривоногова А.С., Мартынов Б.Г., Пушков Ю.Л., Спиридонов С.В., Назарова М. Об одной особенности вертикальной динамики лесного трактора с колесной формулой 4К4 : сб. ст. по матер. науч.-техн. конф. института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2019 г. / отв. ред. В.А. Соколова. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 275–280. URL: <http://spbftu.ru>

Орлов С.Ф. Теория и применение агрегатных машин на лесозаготовках. М.: Гослесбумиздат, 1963. 271 с.

Помогаев С.А. Расчет и проектирование специальных лесных машин. Основы компоновки. Л.: ЛТА, 1973. 52 с.

Ротенберг Р.Е. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода. М.: Машиностроение, 1973. 392 с.

Рыскин Ю.Е. Особенности микропрофиля трелевочных волоков и их статистические характеристики // Труды ЦНИИМЭ. 1970. Вып. 103. С. 148–157.

Силуков Ю.Д., Плужников Н.Н. Статистические характеристики воздействия микропрофиля лесовозных дорог // Автомобильная промышленность. 1973. № 5. С. 20–22.

Цзе Ф.С., Морзе И.Е., Хинкл Р.Т. Механические колебания. М.: Машиностроение, 1966. 508 с.

References

Cze F.S., Morze I.E., Hinkl R.T. Mekhanicheskie kolebaniya. M.: Engineering, 1966. 508 p. (In Russ.)

Dobrynin Y.A. Issledovanie vertikal'noj dinamiki kolesnogo traktora na trelevke lesa v usloviyah rubok promezhutochnogo pol'zovaniya: dis. ... candidate of technical sciences. L.: LTA, 1973. 205 p. (In Russ.)

Dobrynin Y.A., Krivonogova A.S., Martynov B.G., Pushkov Yu.L., Spiridonov S.V., Nazarova M. Ob odnoj osobennosti vertikal'noj dinamiki lesnogo traktora s kolesnoj formuloj 4K4: sb. St. po mater. nauch.-tekhn. konf. instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauchno-issledovatel'skih rabot 2019 goda. Managing editor V.A. Sokolova. SPb.: SPbSFTU, 2020, pp. 275–280. URL: <http://spbftu.ru> (In Russ.)

Orlov S.F. Teoriya i primeneniye agregatnyh mashin na lesozagotovkah. M.: Goslesbumizdat. 1963. 271 p. (In Russ.)

Pomogaev S.A. Raschet i proektirovaniye special'nyh lesnyh mashin. Osnovy komponovki. L.: LTA, 1973. 52 p. (In Russ.)

Rotenberg R.E. Podveska avtomobilya. Kolebaniya i plavnost' hoda. M.: Engineering, 1973. 392 p. (In Russ.)

Ryskin Y.E. Osobennosti mikroprofilya trelevochnyh volokov i ih statisticheskie karakteristiki. *Works of the CRIME*, 1970, iss. 103, pp. 148–157. (In Russ.)

Silukov Y.D., Pluzhnikov N.N. Statisticheskie karakteristiki vozdeystviya mikroprofilya lesovoznyh dorog. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 1973, no. 5, pp. 20–22. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 15.04.2022

Добрынин Ю.А., Андронов А.В., Зверев И.А. К вопросу оценки компоновки трелевочного трактора с колесной формулой 4К4 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 172–180. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.172-180

В статье предлагается оценивать компоновку трелёвочного колесного трактора коэффициентом неравномерности распределения нагрузок на передние и задние опоры (оси) в процессе его движения по неровностям пути. Его можно использовать и для других транспортных средств различного назначения.

Ключевые слова: трелёвочный трактор, компоновка, нагрузка на оси, неравномерность нагрузок, коэффициент неравномерности нагрузок.

Dobrynin Yu.A., Andronov A.V., Zverev I.A. Approach to estimating the layout of a 4K4 skidder. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 172–180 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.172-180

The article proposes to evaluate the layout of a wheeled skidder by the coefficient of uneven distribution of loads on the front and rear supports (axes) in the process of its movement along the uneven track. It can also be used for other vehicles for various purposes.

Keywords: skidder, layout, axle load, load unevenness, coefficient of load unevenness.

ДОБРЫНИН Юрий Андреевич – профессор кафедры прикладной механики и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 5526-1250.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: dobryninua-ltu@mail.ru

DOBRYNIN Yuri A. – professor of Applied mechanics and engineering graphics department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5526-1250.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: dobryninua-ltu@mail.ru

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 8345-3722.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ANDRONOV Alexander V. – Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8345-3722.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ЗВЕРЕВ Игорь Андреевич – ассистент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 1126-2121.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: igorzv1997@gmail.com

ZVEREV Igor A. – assistant of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 1126-2121.

194021. Institutsky per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: igorzv1997@gmail.com