

**DOI: 10.12731/2227-930X-2019-3-7-18****УДК 629.1: 631.3**

## **ПОИСК РАЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИН ВЕДУЩИХ КОЛЕС ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ**

*Сидоров М.В., Сидорова А.В.*

*Рассмотрена динамическая модель технологического модуля с двумя вращающимися массами: обода и шины ведущего колеса и поступательной массы технологического модуля. Шина ведущего колеса технологического модуля характеризуется коэффициентами жесткости и демпфирования. Приведена методика оптимизации характеристики пневматической шины ведущего колеса технологического модуля с учетом спектральной плотности выходной нагрузки технологического модуля. За показатель эффективности демпфирования шины ведущих колес технологического модуля принята дисперсия спектральной плотности. Резонансный эффект определяется по наличию у кривой спектральной плотности колебаний выходного процесса технологического модуля явно выраженных экстремумов (пиков).*

*За рациональные значения коэффициентов жесткости и демпфирования шины ведущих колес технологического модуля при выполнении технологической операции МТА с ТМ приняты их значения, соответствующие минимальному значению целевой функции.*

***Цель** – определение рациональных параметров пневматических шин колес технологического модуля по минимальному значению целевой функции.*

***Метод или методология проведения работы:** в статье использованы методы статистической динамики и теории случайных процессов.*

***Результаты:** повышена плавность хода трактора демпфированием колебаний тягового усилия за счет подбора рациональных*

значений эластичности пневматических шин колес и инерционности поступательной массы технологического модуля.

**Область применения результатов:** полученные результаты целесообразно применять для повышения плавности хода трактора и виброзащитности тракториста.

**Ключевые слова:** демпфирование; технологический модуль; спектральная плотность; поверхность отклика.

## SEARCH FOR RATIONAL TYRE PERFORMANCE PROCESS MODULE DRIVE WHEELS

*Sidorov M.V., Sidorov A.V.*

*The dynamic model of technological mode with two rotating masses is considered: rim and bus of the driving wheel and speed mass of the technological module. Tire of driving wheel of t-nological module is characterised by coefficients of circumferential gesture-bone and damping. The procedure of optimization of the characteristics of the pneumatic tire of the driving wheel of the process module is presented taking into account the spectral density of the input load of the process module. Spectral density dispersion is taken as an index of efficiency of bus damping of driving wheels of technological-biological module. Resonance effect is determined by presence of marked extremes (peaks) at the curve of spectral density of oscillations of output process of technological module.*

*The rational values of stiffness and damping coefficients of the bus of the driving wheels of the process module during MTA with TM of the process operation are taken as their values corresponding to the minimum value of the target function.*

**Objective** – determination of rational parameters of pneumatic tires of process module wheels by minimum value of target function.

**Method or methodology of work:** the article uses methods of statistical dynamics and theory of random processes.

**Results:** increased smoothness of tractor travel by damping of traction force oscillations due to elasticity of pneumatic tires of wheels and inertia of translational mass of process module.

**Field of result application:** *obtained results are expedient to be used for improvement of tractor smooth motion and vibration protection of tractor driver.*

**Keywords:** *damping; process module; wire density; response surface.*

Для реализации запаса мощности двигателя энергонасыщенного трактора, еще в 70-е годы прошлого столетия был предложен технологический модуль (ТМ), который представлял собой третий подкатной мост к трактору [1]. Основное назначение ТМ состоит в создании дополнительной силы тяги, побочным положительным его свойством являются сглаживание колебаний силы сопротивления рабочих органов сельскохозяйственной машины или орудия. Демпфирование колебаний осуществляется за счет инерционности поступательной и вращающихся масс технологического модуля, а также упругодемпфирующих параметров шин колес. Поиск рациональных значений жесткостных и амортизационных параметров шин колес ТМ является актуальной задачей, решение которой позволит повысить плавность хода трактора, а также повысить виброзащищенность тракториста [2, 3]. Для описания колебаний силы сопротивления рабочих органов сельскохозяйственной машины или орудия в последнее время получили методы статистической динамики [4...7].

Рациональные характеристики шины ведущих колес технологического модуля определяем из условия обеспечения технологическим модулем минимального значения спектральной плотности колебаний его выходного параметра (усилия на навеске трактора)  $S_{\text{вых}}(\omega)$  в диапазоне его рабочих частот и отсутствие резонансных режимов при работе машинно-тракторного агрегата.

За показатель эффективности демпфирования шины его ведущих колес принимаем дисперсию спектральной плотности по выражению

$$D = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} S_{\text{вых}}(\omega) d\omega = \min, \quad (1)$$

где  $\omega_{\min}, \omega_{\max}$  – диапазон частот случайного процесса,  $\text{с}^{-1}$ .

За количественный показатель наличие резонансного эффекта можно принять отношение максимального значения спектральной плотности колебаний усилие на навеске трактора (выходного параметра технологического модуля)  $S_{\text{вых}}(\omega)$  в рассматриваемом диапазоне частот к дисперсии  $D$  [6] из выражения (1):

$$K = \frac{S_{\text{вых.max}}}{D}.$$

Обеспечение минимального значения рассмотренного коэффициента, позволит исключить резонансные режимы в технологическом модуле.

Целевая функция выбора рационального значения характеристик шины ведущих колес технологического модуля может быть сформулирована в следующем виде:

$$F(c, k) = \alpha_1 D + \alpha_2 K = \min, \quad (2)$$

где  $D$  – дисперсия кривой спектральной плотности колебаний усилия на навеске трактора;

$K$  – коэффициент резонансных режимов;

$\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты значимости составляющих.

Поиск рациональных значений коэффициентов жесткости и демпфирования шины ведущих колес технологического модуля при выполнении технологической операции МТА с ТМ, а именно – заданной кривой спектральной плотности колебаний усилия на навеске трактора  $S_{\text{ex}}(\omega)$ , состоит в подборе значений характеристики шины таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение условия (2).

За рациональные значения коэффициентов жесткости и демпфирования шины ведущих колес технологического модуля при выполнении МТА с ТМ технологической операции можно принять их значения, соответствующие минимальному значению целевой функции  $F(c, k)$  (экстремуму, если таковой имеется).

Используя передаточную функцию  $W_{\text{ТМ}}(j\omega)$  можно определить спектральную функцию выходного процесса  $S_{\text{вых}}(\omega)$  технологического модуля через его спектральную функцию входной процесс  $S_{\text{ex}}(\omega)$  [7, 8]:

$$S_{вых}(\omega) = |W_{TM}(j\omega)|^2 \cdot S_{вх}(\omega). \quad (3)$$

В отличие от работы [9], где рассматривалась динамическая модель всего трактора с технологическим модулем, в данной статье, для определения передаточной функции, технологический модуль рассмотрен как отдельная динамическая модель, изображенная на рисунке 1 [10...12].

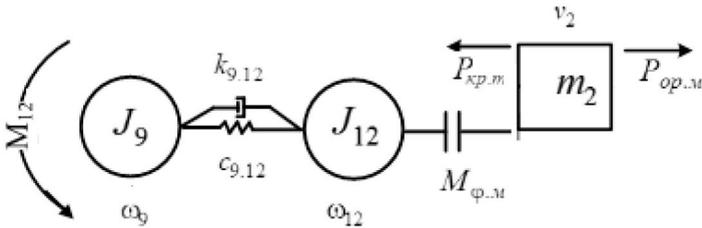


Рис. 1. Схема динамической модели технологического модуля

Технологический модуль представлен моделью с вращающимися массами с моментами инерции: обода  $J_1$  и шины  $J_2$  ведущего колеса и поступательной массы  $m_2$  ТМ. Шина ведущего колеса технологического модуля характеризуется коэффициентами окружающей жесткости  $c_{12}$  и демпфирования  $k_{12}$ .

Согласно динамической модели (рисунок 1) движение технологического модуля описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} m_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{M_{ф.м}}{r_3} - P_{f.м} + P_{кр.м} - P_{опр.м}; \\ v_2 = \omega_{12} r_3 - \frac{d\lambda_{ш.м}}{dt} - \beta_3 \lambda_{ш.м}; \\ M_{ф.м} = \left( k_{12.2} \frac{d\lambda_{ш.м}}{dt} + c_{12.2} \lambda_{ш.м} + \frac{a_{ш.м}}{r_3} R_m \right) r_3; \\ P_{f.м} = a_{ш.м} R_m; \\ a_{ш.м} = a_{0.м} + \lambda_{ш.м}; \\ a_{0.м} = f_m r_3. \end{cases} \quad (4)$$

здесь  $P_{кр.м}$  и  $P_{опр.м}$  – тяговые усилия на навесках трактора и технологического модуля, соответственно;

$M_{\phi.m}$  – момент взаимодействия ведущих колес с почвой [6, 13 ... 15];  
 $a_m$  – смещение вертикальной реакции  $R_m$  относительно оси ведущего колеса технологического модуля;

$\lambda_{ш.м}$  – продольная деформация шины ведущего колеса технологического модуля;

$r_3$  – динамический радиус колеса;

$v_2$  – действительная скорость технологического модуля;

$\omega_{12}$  – угловая скорость шин ведущих колес технологического модуля;

$\beta_3$  – коэффициент буксования ведущих колес технологического модуля.

Используя преобразование Лапласа [6] и нулевые начальные условия получим из уравнения (4) передаточную функцию:

$$W_{\Delta M_{\phi.m} \Delta P_{op.m}}(s) = \frac{Q_1 P_2 - P_1}{Q_2},$$

здесь приняты следующие обозначения многочленов от  $s$ :

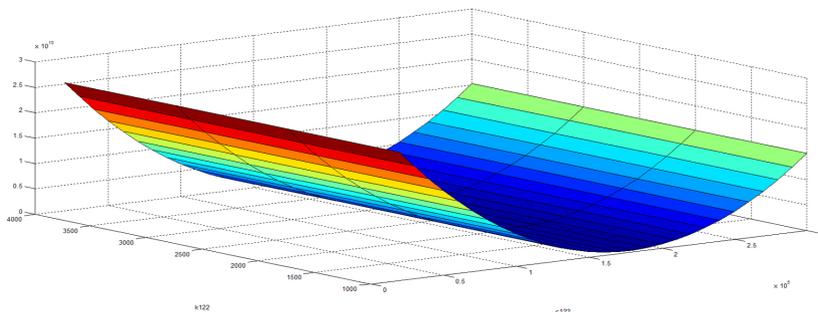
$$\begin{cases} Q_1 = m_2 s; \\ Q_2 = k_{12.2} s + c_{12.2} r_3 + m_2 g; \\ P_1 = k_{12.2} s + c_{12.2}; \\ P_2 = s + \beta_3. \end{cases}$$

Поверхность целевой функции была определена в пределах изменения величины продольной деформации  $c_{12.2}$  от  $2 \cdot 10^4$  до  $30 \cdot 10^4$  Н/м и коэффициента демпфирования  $k_{12.2}$  от 1000 до 4000 Н·с/м шины ведущих колес технологического модуля [9].

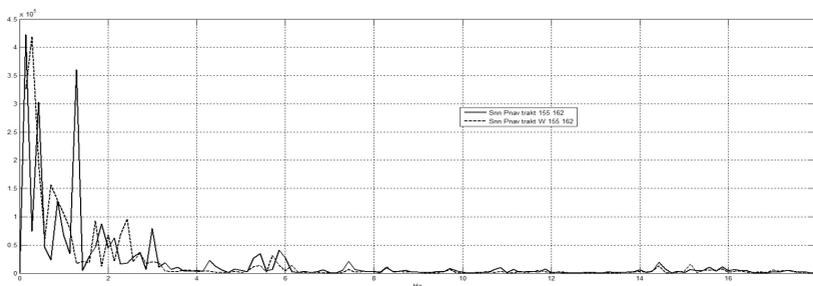
Анализ данной целевой функции (рисунок 2) позволяет сделать вывод о наличии экстремума целевой функции только по одному параметру – коэффициенту продольной жесткости шины ведущих колес технологического модуля (180000 Н/м).

Используя передаточную функцию были определены спектральные функции выходного процесса технологического модуля (горизонтальной составляющей усилия на навеске модуля и трактора МТЗ-82) при выполнении МТА технологической операции с тяжелыми дисками (БДТ-7), предназначенными для трактора класса 3.

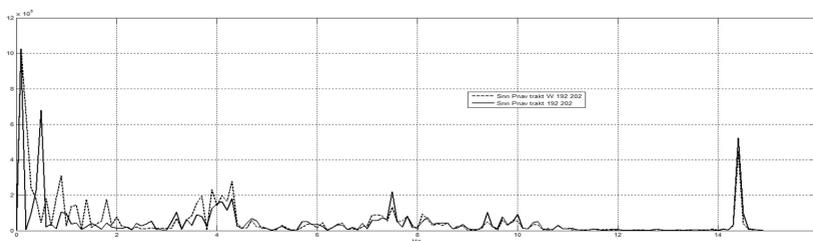
На рисунках 3 и 4 приведены сравнение теоретической и экспериментальных спектральных плотностей выходных процессов технологического модуля при включенном (рис. 3) и выключенном (рис. 4) его приводе.



**Рис. 2.** Поверхность целевой функции для определения рациональных характеристик шины ведущих колес технологического модуля



**Рис. 3.** Спектральные плотности выходного процесса технологического модуля с включенным приводом:  
 - - - - - теоретическая и ————— -экспериментальная



**Рис. 4.** Спектральные плотности выходного процесса технологического модуля с отключенным приводом:  
 - - - - - теоретическая и ————— -экспериментальная

Адекватность приведенной динамической модели технологического модуля подтверждена по минимуму суммы квадратов разности амплитуд теоретических и экспериментальных спектральных плотностей, представленных на рисунках 3 и 4. В тоже время, можно отметить визуальное совпадение основных частот кривых теоретических и экспериментальных спектральных плотностей выходных процессов, как при включенном (рис. 3), так и выключенном (рис. 4) приводе ТМ.

На основании проведенных исследований сделаны выводы.

1. В результате моделирования с использованием динамической модели технологического модуля получены рациональные значения коэффициента жесткости шины его ведущих колес технологического модуля при выполнении МТА с ТМ технологической операции соответствующие минимальному значению целевой функции. Рациональные значения коэффициента демпфирования не выявлены, а коэффициент жесткости шины ведущих колес технологического модуля составляют 180000 Н/м.

2. Разработанная математическая модель технологического модуля позволила построить теоретические спектральные плотности горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора при комплектовании его с технологическим модулем при использовании рациональных значений коэффициентов жесткости шин, его ведущих колес. Использование шин на технологическом модуле с рациональным значением коэффициента жесткости позволяет в среднем в 3...4 раза снизить амплитуду колебаний его выходного параметра. При этом частотный диапазон смещается в более низкую зону от 0 до 2,5 Гц по сравнению.

### *Список литературы*

1. Кутьков Г.М. Исследования модульного энерготехнологического средства // Тракторы и сельхозмашины. 1989. № 12. С. 3–9.
2. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили: теория и технологические свойства: Учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 506 с.
3. Сидоров М.В. Упругодемпфирующие свойства транспортно-технологического модуля в составе сельскохозяйственного машин-

- но-тракторного агрегата // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. №10-2 (41). С. 119–121.
4. Кутьков Г.М. Тяговая динамика трактора. М.: Машиностроение, 1980. 215 с.
  5. Поливаев О.И. Снижение динамических нагрузок в машинно-тракторных агрегатах / О.И. Поливаев, А.П. Полухин. Воронеж: ВГАУ, 2000. 197 с.
  6. Панков А.В. Повышение эффективности использования МТА за счет применения пневмогидравлического упругодемпфирующего привода ведущих колес трактора класса 1,4: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2009. 145 с.
  7. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. Л.: Колос, 1970. 375 с.
  8. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. М.: Мир, 1971, выпуск 1. 316 с.
  9. Сидоров М.В. Повышение эффективности использования машинно-тракторного агрегата за счет применения технологического модуля с ведущими движителями для трактора тягового класса 1,4: дис. .... канд. техн. наук: Калуга, 2016. 153 с.
  10. Кузнецов Н.Г. Составление математических моделей машинно-тракторных агрегатов с упругими звеньями в сочленениях и их исследование методами теории случайных функций: Уч. пос. / Н.Г. Кузнецов, В.Г. Кривов, Ю.П. Дегтярев, Г.И. Жидких. Волгоград, 1989. 101 с.
  11. Жутов А.Г. Математическая модель МТА / В.И. Авромов, А.А. Карсаков // Тракторы и сельхозмашины. 2010. №2. С. 24–25.
  12. Кравченко В.А. Математическая модель машинно-тракторного агрегата с УПД в трансмиссии трактора / В.А. Кравченко, Л.В. Кравченко, В.В. Серегина // Журнал Кубанского ГАУ. 2014. №103. С. 251–261.
  13. Кравченко В.А. Повышение динамических и эксплуатационных показателей сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов: монография. Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2010. 224 с.
  14. Яровой В.Г. Шина как упругодемпфирующее звено сельскохозяйственного трактора / В.Г. Яровой, А.П. Шарапов. // Вестник аграрной науки Дона. Зерноград, 2010. №3. С. 25–30.

15. Van Putten, S. Improvement of handling characteristics of “eco”-tires through measures within the wheel subsystem / S. Van Putten, J. Kubenz, H. Abel, G. Prokop, R. Clauß. // FISITA World Automotive Congress, Maastricht, 2.-6. Juni 2014, pp. 1–10.

### *References*

1. Kut'kov G.M. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1989. № 12, pp. 3–9.
2. Kut'kov G.M. *Traktory i avtomobili: teoriya i tekhnologicheskie svoystva* [Tractors and cars: theory and technological properties]. M.: INFRA-M, 2014. 506 p.
3. Sidorov M.V. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2014. №10-2 (41), pp. 119–121.
4. Kut'kov G.M. *Tyagovaya dinamika traktora* [Traction dynamics of a tractor]. M.: Mashinostroenie, 1980. 215 p.
5. Polivaev O.I., Polukhin A.P. *Snizhenie dinamicheskikh nagruzok v mashinno-traktornykh agregatakh* [Reducing dynamic loads in machine-tractor units]. Voronezh: VGPU, 2000. 197 p.
6. Pankov A.V. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya MTA za schet primeneniya pnevmogidravlicheskogo uprugodempfiruyushchego privoda vedushchikh koles traktora klassa 1,4* [Improving the efficiency of using MTA through the use of a pneumohydraulic elastic damping drive of the driving wheels of a tractor of class 1.4]. Volgograd, 2009. 145 p.
7. Lur'e A.B. *Statisticheskaya dinamika sel'skokhozyaystvennykh agregatov* [Statistical dynamics of agricultural units]. L.: Kolos, 1970. 375 p.
8. Dzhenkins G., Vatts D. *Spektral'nyy analiz i ego prilozheniya* [Spectral analysis and its applications]. M.: Mir, 1971, № 1. 316 p.
9. Sidorov M.V. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya mashinno-traktornogo agregata za schet primeneniya tekhnologicheskogo modulya s vedushchimi dvizhitelyami dlya traktora tyagovogo klassa 1,4* [Improving the efficiency of using a machine-tractor unit through the use of a technological module with driving engines for a tractor of traction class 1.4]. Kaluga, 2016. 153 p.

10. Kuznetsov N.G., Krivov V.G., Degtyarev Yu.P., Zhidkikh G.I. *Sostavlenie matematicheskikh modeley mashinno-traktornykh agregatov s uprugimi zven'yami v sochleneniyakh i ikh issledovanie metodami teorii sluchaynykh funktsiy* [Compilation of mathematical models of machine-tractor units with elastic links in the joints and their study by methods of the theory of random functions]. Volgograd, 1989. 101 p.
11. Zhutov A.G., Karsakov A.A., Avramov V.I. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2010. №2, pp. 24–25.
12. Kravchenko V.A., Kravchenko L.V., Seregina V.V. *Zhurnal Kubanskogo GAU*. 2014. №103, pp. 251–261.
13. Kravchenko V.A. *Povyshenie dinamicheskikh i ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennykh mashinno-traktornykh agregatov* [Improving the dynamic and operational indicators of agricultural machine-tractor units]. Zernograd: FGOU VPO AChGAA, 2010. 224 p.
14. Yarovoy V.G., Sharapov A.P. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. Zernograd, 2010. №3, pp. 25–30.
15. Van Putten, S. Improvement of handling characteristics of “eco”-tires through measures within the wheel subsystem / S. Van Putten, J. Kubenz, H. Abel, G. Prokop, R. Clauß. *FISITA World Automotive Congress, Maas-tricht, 2.-6. Juni 2014*. pp. 1–10.

#### ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Сидоров Максим Владимирович**, доцент кафедры «Механизация сельскохозяйственного производства», кандидат технических наук

*Калужский филиал Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева  
ул. Вишневого, 27, г. Калуга, Калужская область, 248007,  
Российская Федерация  
sidorov.maxim.79@mail.ru*

**Сидорова Анастасия Владимировна**, аспирант кафедры «Экология и промышленная безопасность»

*Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана*

*ул. Баженова, 2, г. Калуга, Калужская область, 248000, Российская Федерация  
nancy85@yandex.ru*

#### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Sidorov Maxim Vladimirovich**, Associate Professor of the Department of Mechanization of Agricultural Production, Candidate of Technical Sciences

*Kaluzhsky branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Russian Timiryazev State Agrarian University"*

*27, Vishnevsky St., Kaluga, Kaluga region, 248007, Russian Federation*

*sidorov.maxim.79@mail.ru*

*ORCID: 0000-0001-8022-866X*

**Sidorova Anastasia Vladimirovna**, Graduate student of Ecology and Industrial Safety Department

*Kaluga Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Bauman Moscow State Technical University"*

*2, Bazhenov St., Kaluga, Kaluga region, 248000, Russian Federation*

*nancy85@yandex.ru*