

*На правах рукописи*



**СИДОРОВ Максим Владимирович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА  
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
МОДУЛЯ С ВЕДУЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ  
ДЛЯ ТРАКТОРА ТЯГОВОГО КЛАССА 1,4**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Калуга – 2017**

Работа выполнена на кафедре автомобиле- и тракторостроения Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент  
**Алакин Виктор Михайлович**

Официальные оппоненты: **Кравченко Владимир Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной аграрный университет» в г. Зернограде (Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ), профессор кафедры тракторов и автомобилей;

**Ворохобин Андрей Викторович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

Защита состоится 8 июня 2017 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I (Воронежского ГАУ), по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Воронежского ГАУ и на сайте [www.vsau.ru](http://www.vsau.ru) («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=4551>.

Автореферат разослан 7 апреля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Афоничев Дмитрий Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Многолетний опыт эксплуатации машинно-тракторных агрегатов (МТА) в различных регионах Российской Федерации показал, что рост энергонасыщенности тракторов не дал пропорционального прироста производительности МТА и увеличил энергозатраты на единицу выполненной работы.

Альтернативное направление развития тракторостроения, заключающееся в замене трактора-тягача, при повышении его энергонасыщенности, на трактор тягово-энергетической концепции и создание на его основе тягово-приводных машинно-тракторных агрегатов еще недостаточно изучено. Особый интерес представляет формирование МТА по модульному принципу с использованием технологических модулей с ведущими колесами.

Заложенный резерв мощности двигателя, который не может быть реализован через ходовую систему энергонасыщенного трактора-тягача, при модульной системе агрегатирования реализуется через ведущие колеса технологического модуля за счет использования в качестве сцепного не только веса трактора, но и веса всего агрегата, включая его технологическую часть.

Непрерывные колебания внешней нагрузки в условиях реальной эксплуатации МТА приводят к снижению установленной мощности двигателя и увеличению удельного расхода топлива на единицу выполненной работы. Положительным побочным свойством технологического модуля является демпфирование колебаний, создаваемых силой сопротивления сельскохозяйственного орудия. Гашение колебаний осуществляется эластичностью пневматических шин ведущих колес и инерционностью массы технологического модуля. Исследование упругодемпфирующих свойств технологического модуля представляет определенный интерес, потому что они могут существенно снизить динамическую нагрузку на трансмиссию и двигатель.

Повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов на базе энергонасыщенных тракторов на основе модульной системы агрегатирования, прирост производительности которых будет осуществляться без повышения удельных энергозатрат на выполняемую работу является важной научной проблемой, имеющей большое народно-хозяйственное значение.

Диссертация выполнялась в рамках плана госбюджетной научно-исследовательской работы кафедры автомобиле- и тракторостроения Калужского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» «Повышение эффективности и долговечности использования наземных транспортно-технологических средств».

**Степень разработанности темы.** Основные вопросы, связанные с исследованием динамики МТА, повышением его эффективности и снижением энергозатрат, были достаточно подробно рассмотрены в работах В.Н. Болтинского, С.А.Иофинова, Г.М.Кутькова, Л.Е.Агеева, В.Н. Попова, В.Я. Аниловича, И.Б. Барского, А.Г. Жутова, В.А. Кравченко, И.П. Ксеновича, Н.Г. Кузнецова, О.И. Поливаева, В.Л. Строкова и других. Результаты исследований, выполненные указанными учеными, нашли применение в различных технических решениях при создании новых эффективных конструкций тракторов.

На основании проведенного анализа существующих упругодемпфирующих приводов и устройств по снижению колебательных процессов в МТА вы-

явлены их преимущества и недостатки, а также влияние на колебания внешней нагрузки, действующей на нижнюю ось механизма навески трактора и момента сопротивления на входе в двигатель.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является повышение эффективности использования машинно-тракторных агрегатов (МТА) на базе энергонасыщенных тракторов тягового класса 1,4 за счет подбора рациональных параметров технологического модуля при модульной системе агрегатирования.

В соответствии с целью исследований предусмотрено решение следующих задач.

- провести изыскание модульного построения в виде компоновочной и функциональной схемы МТА для трактора тягового класса 1,4 с технологическим модулем и разработать экспериментальный образец технологического модуля, обеспечивающий совмещение снижения колебаний внешней нагрузки и увеличения тягового усилия трактора при уменьшении удельного расхода топлива на единицу выполненной работы;

- разработать методику расчета рационального веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования и балластировании энергонасыщенных тракторов с учетом потерь мощности в трансмиссии и на буксование отдельно по ведущим мостам, и использования энергонасыщенного трактора в двух смежных тяговых классах;

- разработать математическую модель динамических процессов МТА с учетом наличия в его составе предложенного технологического модуля с ведущими колесами, обладающего упругодемпфирующими свойствами, позволяющую определить рациональные параметры технологического модуля и провести имитационное моделирование для установления взаимосвязи упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель;

- провести экспериментальное подтверждение и экономическую оценку эффективности применения технологического модуля с ведущими колесами для трактора тягового класса 1,4 при модульном построении МТА.

**Научная новизна.** Научной новизной обладают:

- зависимости для определения рационального веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования и балластировании энергонасыщенных тракторов, отличающиеся учетом потерь мощности в трансмиссии и на буксование отдельно по ведущим мостам и использования энергонасыщенного трактора в двух смежных тяговых классах;

- математическая модель динамических процессов МТА, отличающаяся учетом особенностей функционирования МТА с технологическим модулем, обладающим упругодемпфирующими свойствами;

- результаты имитационного моделирования МТА как динамической системы, отличающиеся тем что определены взаимосвязи упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель;

- экспериментальный образец технологического модуля с ведущими колесами для модульного комплектования МТА на базе трактора тягового класса 1,4, отличающийся рациональными параметрами и возможностью навески сельскохозяйственных машин, предназначенных для тракторов более высокого тягового класса.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическое значение результатов исследования заключается в выявлении влияния технологи-

ческого модуля на снижение колебаний внешней нагрузки, действующей на нижнюю ось механизма навески трактора и момента сопротивления на входе в двигатель. Теоретически обоснованы на основе математической модели динамических процессов МТА, учитывающей в его составе предложенный технологический модуль с ведущими колесами и упругодемпфирующими свойствами, и подтверждены экспериментально рациональные параметры технологического модуля для трактора тягового класса 1,4 в составе МТА.

Применение технологического модуля для трактора тягового класса 1,4 позволяет повысить производительность МТА и снизить удельный расход топлива на единицу выполненной работы.

**Объекты исследования** – рабочие процессы МТА на базе колесного трактора тягового класса 1,4 Минского тракторного завода с технологическим модулем, обладающим упругодемпфирующими свойствами и ведущими колесами в агрегате с плугом, тяжелой дисковой бороной.

**Предмет исследования** – закономерности формирования тягово-динамических процессов МТА на базе колесного трактора с технологическим модулем, обладающим упругодемпфирующими свойствами и ведущими колесами.

**Методология и методы исследования.** В работе применены методы дифференциального и интегрального исчисления, теории эксплуатационных свойств МТА, моделирования динамических систем.

Оценка МТА на базе серийного трактора МТЗ-82 и опытного вариантов МТЗ-82 с технологическим модулем проводилась на основе лабораторно-полевых исследований на вспашке и дисковании стерни колосовых.

Данные исследования выполнены с использованием тензометрического измерительного комплекса. Полученные результаты обрабатывались в программе Matlab.

Технико-экономическую оценку применения технологического модуля проводили по принятой методике с использованием результатов, полученных при сравнительных полевых испытаниях МТА на базе МТЗ-82 с технологическим модулем.

**Положения, выносимые на защиту:**

- компоновочная схема, реализованная в МТА с технологическим модулем, обеспечивающая совмещение снижения колебаний внешней нагрузки и увеличения тягового усилия трактора, при уменьшении удельного расхода топлива;

- рациональные параметры технологического модуля с ведущими колесами, обладающего упругодемпфирующими свойствами для модульного комплектования агрегатов на основе энергонасыщенных тракторов, обеспечивающие снижение колебаний тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора тягового класса 1,4;

- зависимости для определения рационального веса технологического модуля и трактора, мощности двигателя при модульной системе агрегатирования или балластировании энергонасыщенных тракторов, позволяющие учитывать потери мощности в трансмиссии и на буксование отдельно по ведущим мостам, и использование энергонасыщенного трактора в двух смежных тяговых классах;

- математическая модель и параметры динамических процессов МТА, позволяющие учитывать наличие в его составе предложенного технологического модуля с ведущими колесами, обладающего упругодемпфирующими свойствами;

- имитационное моделирование МТА как динамической системы, позволяющее устанавливать взаимосвязь упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность под-

тверждается результатами лабораторно-полевых испытаний, проведенных с достаточным количеством опытов и аппаратурой, обеспечивающих требуемую точность измерений, обработкой опытных данных с использованием математических программ на ПЭВМ.

Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на международных, всероссийских, межрегиональных и вузовских научно-практических конференциях Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, Брянского ГАУ за период с 2001 по 2016 годы.

Результаты проведенных исследований внедрены в сельскохозяйственной артели «Колхоз Маяк» Калужской области и крестьянском фермерском хозяйстве «Ягодное» Брянской области, подтверждают целесообразность применения технологических модулей с ведущими колесами. Данные технологические модули могут быть использованы для повышения эффективности использования МТА на базе энергонасыщенных универсально-пропашных тракторов.

Результаты диссертации используются в учебном процессе кафедры автомобиле- и тракторостроения Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана при подготовке специалистов по специальности 23.05.01 и кафедры механизации сельскохозяйственного производства Калужского филиала РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева и Брянского ГАУ при подготовке бакалавров по направлению 35.03.06.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежит постановка цели и задач исследования, разработка программы исследований. Принято непосредственное участие в сборе и обработке необходимых исходных данных, проведении теоретических, лабораторно-полевых исследований и сравнительных испытаний на полях сельскохозяйственной артели «Колхоз Маяк» Калужской области и учебно-опытного хозяйства Брянского ГАУ; обработке полученных экспериментальных данных; апробации результатов исследования на международных, всероссийских, межрегиональных и вузовских научно-практических конференциях в 2001–2016 годах, а также в условиях сельскохозяйственной артели «Колхоз Маяк» Калужской области и крестьянского фермерского хозяйства «Ягодное» Брянской области; подготовке публикаций.

**Публикации.** По результатам теоретических и экспериментальных исследований опубликовано 18 печатных работ, в том числе пять статей – в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, восьми приложений. Объем диссертации составляет 153 страницы машинописного текста, список литературы состоит из 141 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первом разделе «Состояние вопроса и постановка задач исследования»** рассмотрена проблема повышения производительности МТА на основе трактора тяговой концепции и пути расширения тягово-технологических возможностей трактора и способы снижения колебательных процессов в МТА пу-

тем применения упругих звеньев.

Проанализированы такие конструктивные решения, как установка различных упругодемпфирующих приводов и устройств по снижению колебательных процессов в МТА, выявлены их преимущества и недостатки. Рассмотрены принципиальные возможности повышения эффективности использования МТА на базе тракторов с дополнительными ведущими мостами, за счет увеличения тягового усилия трактора.

**Во втором разделе «Теоретические исследования применения в составе МТА технологического модуля с ведущими колесами и обладающего упругодемпфирующими свойствами»** выбрана и обоснована конструктивно-технологическая схема технологического модуля (ТМ). В результате анализа существующих конструкций разработана опытная конструкция технологического модуля с ведущими колесами для трактора тягового класса 1,4 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и тяжелой дисковой бороной БДТ-7

Разработана математическая модель тягово-динамических процессов МТА на базе трактора с технологическим модулем, позволяющая обосновать рациональные параметры технологического модуля, и изучить процессы изменения колебаний тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора тягового класса 1,4 в составе МТА. Для решения задачи по выбору рациональных параметров технологического модуля принята эквивалентная модель реальному МТА с технологическим модулем при установившемся режиме движения (рисунок 2), где  $J_1$  - приведенный момент инерции двигателя;  $J_2$  - момент инерции вращающихся деталей ведомой части муфты сцепления;  $J_3$  - момент инерции вращающихся деталей общей части трансмиссии для всех ведущих мостов;  $J_4$ ,  $J_5$  и  $J_6$  - моменты инерции, вращающихся деталей приводов передних и задних ведущих колес трактора и привода ведущих колес технологического модуля;  $J_7$ ,  $J_8$  и  $J_9$  - моменты инерции дисков передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля;  $J_{10}$ ,  $J_{11}$  и  $J_{12}$  - моменты инерции шин передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля;  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  - поступательно-движущиеся массы: трактора, технологического модуля и агрегатируемой сельскохозяйственной машины;  $c_{23}$  и  $k_{23}$  - окружная жесткость и коэффициент демпфирования общей ча-

сти трансмиссии;  $c_{34}, c_{35}, c_{36}, c_{47}, c_{58}, c_{69}, c_{7.10}, c_{8.11}, c_{9.12}$  и  $k_{34}, k_{35}, k_{36}, k_{47}, k_{58}, k_{69}, k_{7.10}, k_{8.11}, k_{9.12}$  - окружная жесткость и коэффициент демпфирования привода, дисков с деталями привода, шин соответственно передних и задних ведущих колес трактора и ведущих колес технологического модуля;  $M_\partial$  - крутящий момент двигателя;  $M_c$  - момент сопротивления на входе в двигатель;  $M_{\phi.m1}, M_{\phi.m2}$  и  $M_{\phi.m}$  - моменты касательных сил взаимодействия передних и задних ведущих колес трактора и технологического модуля с почвой;  $P_{кр.м}$  - тяговое усилие на механизме навески трактора;  $P_{ор.м}$  - сопротивление со стороны сельскохозяйственной машины на механизме навеске технологического модуля.

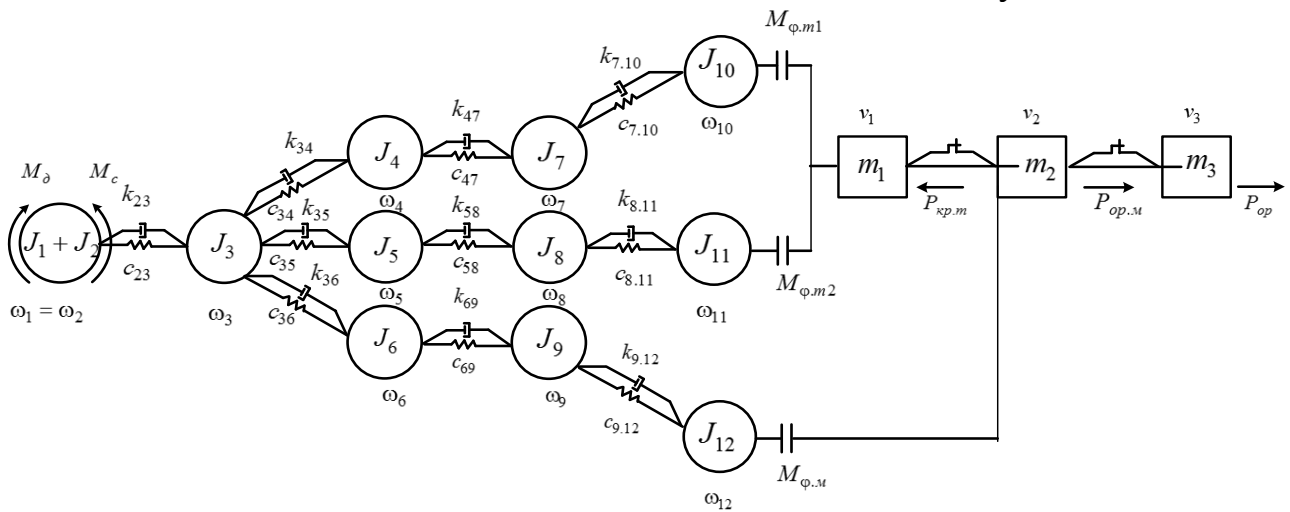


Рисунок 2 - Схема эквивалентной укрупненной динамической модели МТА с ТМ

Для исследования влияния технологического модуля на характер нагрузки на навеске трактора, опишем технологический модуль как звено эквивалентной укрупненной динамической модели МТА с ТМ (рисунок 2) следующим уравнением:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 J_9 \frac{d^2 \varphi_9}{dt^2} + k_{9.12} \left( \frac{d\varphi_9}{dt} - \frac{d\varphi_{12}}{dt} \right) + c_{9.12} (\varphi_9 - \varphi_{12}) = M_{9.12}; \\
 J_{12} \frac{d^2 \varphi_{12}}{dt^2} - k_{9.12} \left( \frac{d\varphi_9}{dt} - \frac{d\varphi_{12}}{dt} \right) - c_{9.12} (\varphi_9 - \varphi_{12}) = -M_{\phi.m} \\
 m_2 \frac{dv_2}{dt} = \frac{M_{\phi.m}}{r_3} + P_{кр.м} - P_{ор.м}; \\
 v_2 = \omega_{12} r_3 - \frac{d\lambda_{ш.м}}{dt} - \beta_3 \lambda_{ш.м}; \\
 M_{\phi.m} = \left( k_{12.2} \frac{d\lambda_{ш.м}}{dt} + c_{12.2} \lambda_{ш.м} + \frac{a_{ш.м}}{r_3} R_M \right) r_3; \\
 P_{ф.м} = a_{ш.м} R_M; \\
 a_{ш.м} = a_{0.м} + \lambda_{ш.м}; \\
 a_{0.м} = f_M r_3.
 \end{array} \right. \quad (1)$$

Критерий эффективности технологического модуля как упругодемпфирующего элемента был сформулирован в следующем виде: значения параметров ши-



ны технологического модуля (коэффициента демпфирования и коэффициента жесткости) выбирается таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение условия минимизации колебаний горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора от усилия на навеске технологического модуля и момента касательных сил взаимодействия ведущих колес технологического модуля с почвой:

$$\Delta P_{кр.м}(t) = \min. \quad (2)$$

С учетом выражения (2) условие минимизации колебаний горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора – минимизация дисперсии спектральной плотности этого процесса в некотором частотном диапазоне  $\omega_{\min} < \omega < \omega_{\max}$ , где значение его спектральной плотности минимально

$$D_{P_{кр.м}} = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} S_{P_{кр.м}}(\omega) d\omega = \min$$

При этом следует избегать наличия явно выраженных резонансных пиков в кривой  $S_{P_{кр.м}}(\omega)$ . Исходя из выше сказанного целевая функция выбора оптимального значения параметров технологического модуля по минимуму колебаний горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора:

$$F(k_{12,2}, c_{12,2}) = \alpha_1 D_{P_{кр.м}} + \alpha_2 K_{P_{кр.м}} = \min,$$

где  $D_{P_{кр.м}}$  – дисперсия кривой спектральной плотности горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора;

$\alpha_1, \alpha_2$  – весовые коэффициенты, определяющие степень важности той или иной составляющей;

$K_{P_{кр.м}}$  – коэффициент, учитывающий наличие резонансных пиков в кривой спектральной плотности.

$$K_{P_{кр.м}} = \frac{S_{P_{кр.м} \max}}{D_{P_{кр.м}}}$$

где  $S_{P_{кр.м} \max}$  – максимальное значение спектральной плотности горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора;

$D_{P_{кр.м}}$  – дисперсия данной спектральной плотности.

Выбор оптимальных значений параметров технологического модуля для заданного режима работы (который задан кривой спектральной плотности сопротивления со стороны сельскохозяйственной машины на механизме навеске технологического модуля  $S_{P_{кр.м}}$ ) состоит в подборе значений  $c_{12,2}$  и  $k_{12,2}$  таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение условия (2). Задаваясь режимом работы трактора в агрегате с тяжелой дисковой бороной БДТ-7 была построена поверхность целевой функции и определены оптимальные значения коэффициентов  $c_{12,2}$  и  $k_{12,2}$  (рисунок 3).

Оптимальные значения коэффициента окружной жесткости шины составляет 120000 Нм/рад, коэффициента продольной деформации шины составляет 180000 Н/м, коэффициент демпфирования шины не имеет явно выраженного оптимума. Значения коэффициентов демпфирования соответствуют характеристикам шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,08 МПа.

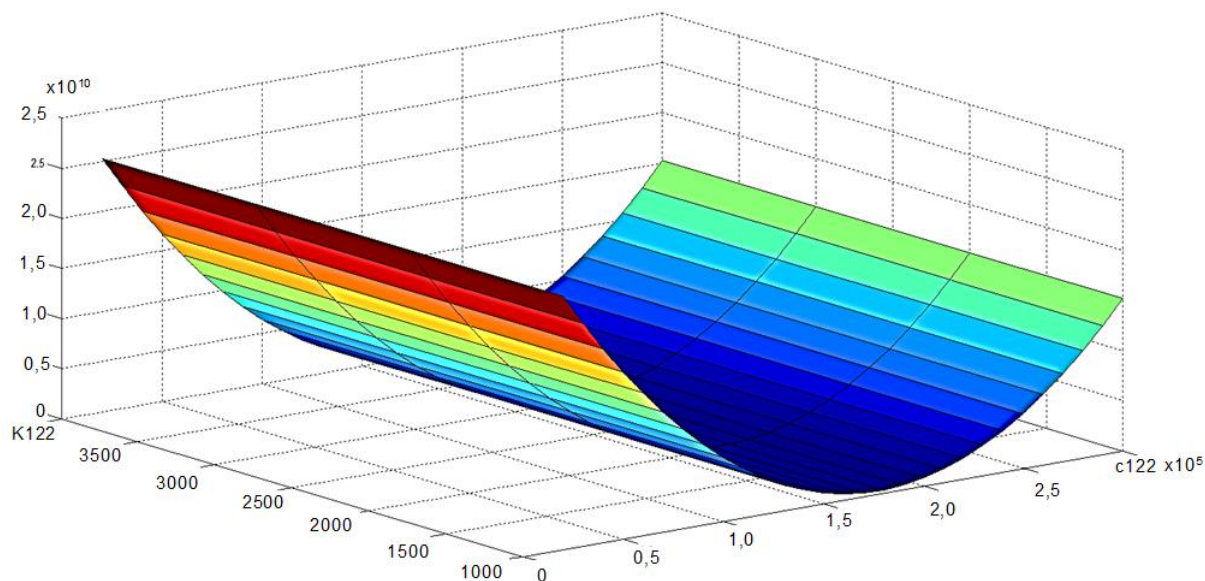


Рисунок 3 - Поверхности целевой функции при изменении продольной жесткости и демпфирования шины ведущих колес технологического модуля

Сравнение кривых теоретических спектральных плотностей горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора, представленных на рисунке 4, позволило выявить следующие закономерности: снижение жесткости шин ведущих колес технологического модуля позволяет значительно снизить амплитуду колебаний усилий на навеске трактора (сплошная линия) в среднем в 3...4 раза и сместить их частотный диапазон в более низкий от 0 до 2,5 Гц. При этом спектральная плотность усилия на навеске трактора, соответствующая режиму работы трактора без технологического модуля находится в более высоком частотном диапазоне.

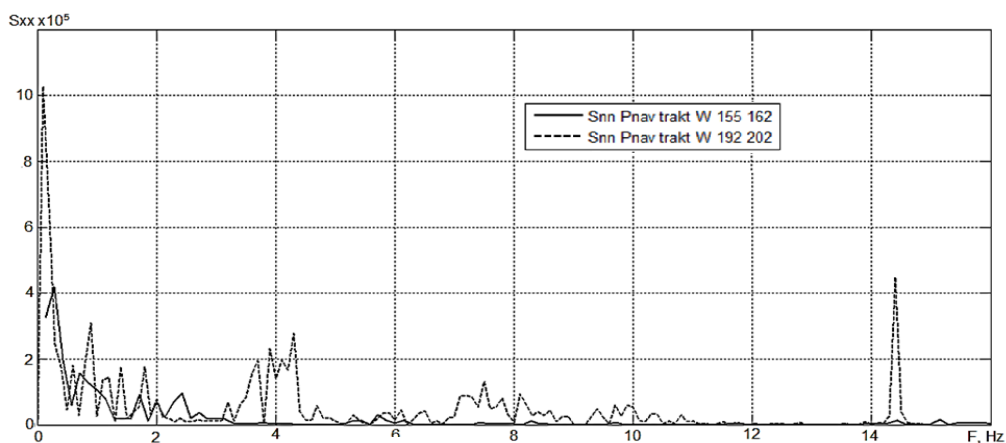


Рисунок 4 – Теоретические спектральные плотности горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора МТЗ-82 с технологическим модулем:

————— - с приводом колес модуля;

----- - без привода колес технологического модуля

Для повышения универсальности колесных тракторов путем использования их с сельскохозяйственными машинами, предназначенными для тракторов разных смежных тяговых классов, необходимо что бы колесный трактор мог развивать несколько номинальных тяговых усилий, соответствующих смежным тяговым классам, что возможно, согласно выражения (3) изменением веса трактора.

Значение номинального тягового усилия трактора пропорционально его весу:

$$P_{кр\ n} = \varphi_{кр\ n} G_{тр}, \quad (3)$$

где  $G_{тр}$  – вес трактора, обеспечивающий условия сцепления движителей с почвой при достижении трактором заданного тягового усилия на лущеной стерне зерновых культур нормальной влажности с буксованием не более допустимого  $\delta_n$  стандартом;

$\varphi_{кр\ n}$  — коэффициент использования веса трактора при номинальном тяговом усилии и работе на лущеной стерне.

Для перехода трактора в более высокий тяговый класс необходимо увеличить его базовый вес на разность между весом трактора верхнего тягового класса и весом трактора нижнего тягового класса:

$$\Delta G_{тр} = G_{тр\ в} - G_{тр\ н}$$

где  $G_{тр\ в}$  и  $G_{тр\ н}$  – вес трактора соответственно верхнего тягового класса и нижнего тягового классов.

Таблица 1 - Результаты расчетов массы технологического модуля и колесного трактора класса 1,4 в различных комплектациях

| Комплектация      | Показатели                 |               |                                |
|-------------------|----------------------------|---------------|--------------------------------|
|                   | Эксплуатационная масса, кг | Тяговый класс | Номинальное тяговое усилие, кН |
| Тяговый класс 1,4 |                            |               |                                |
| трактор           | 3641                       | 1,4           | 14                             |
| Тяговый класс 2   |                            |               |                                |
| трактор с ТМ      | 5097                       | 2             | 20                             |
| ТМ                | 1456                       | 0,6           | 6                              |

Для определения номинальной эксплуатационной мощности двигателя трактора тягово-энергетической концепции с несколькими ведущими мостами предложено уточненное выражение, которое позволило учесть реализацию тягового усилия и потери по отдельным ведущим мостам:

$$N_{н.э} = \frac{\sum_{j=1}^N (P_{кр,j} + P_{f,j}) v_{тр.н}}{\sum_{j=1}^N \eta_{тр,j} k_{Nj} (1 - \delta_{н,j})},$$

где  $P_{кр.н,j}$  и  $P_{f,j}$  — силы тяги и сопротивления качению  $j$  мостов, кН;

$v_{тр.н}$  — скорость трактора, м/с;

$k_{Nj}$  — коэффициент передачи мощности, учитывающий долю мощности, передаваемую через  $j$ -й мост;

$\eta_{тр,j}$  — механический КПД отдельной ветви трансмиссии;

$(1 - \delta_{н,j})$  — КПД буксования  $j$ -го моста.

Таблица 2 - Результаты расчетов эксплуатационной мощности колесного трактора класса 1,4 в различных комплектациях

| Комплектация                | Показатели                     |               |                         |                                     |        |
|-----------------------------|--------------------------------|---------------|-------------------------|-------------------------------------|--------|
|                             | Номинальное тяговое усилие, кН | Тяговый класс | Мощность двигателя, кВт | Энергонасыщенность трактора, кВт/кН |        |
|                             |                                |               |                         | с ТМ                                | без ТМ |
| на базе трактора класса 1,4 |                                |               |                         |                                     |        |
| трактор                     | 14                             | 1,4           | 56,90                   |                                     | 1,59   |
| трактор с ТМ                | 20                             | 2             | 81,93                   | 1,64                                | 2,29   |

Для установления взаимосвязи упругодемпфирующих свойств технологического модуля с колебаниями момента сопротивления на входе в двигатель была составлена динамическая модель МТА на базе трактора с технологическим модулем в программе Simulink среды Matlab в соответствии со схемой эквивалентной укрупненной динамической модели МТА с ТМ (рисунок 2). Динамическая модель состоит из отдельных блоков Subsystem, включает блоки вращательного и поступательного движения, блок действительной скорости, блок взаимодействия с опорной поверхностью и блок внешней нагрузки, а также механизм переключения передач (рисунок 5). Результаты имитационного моделирования приведены в четвертом разделе.

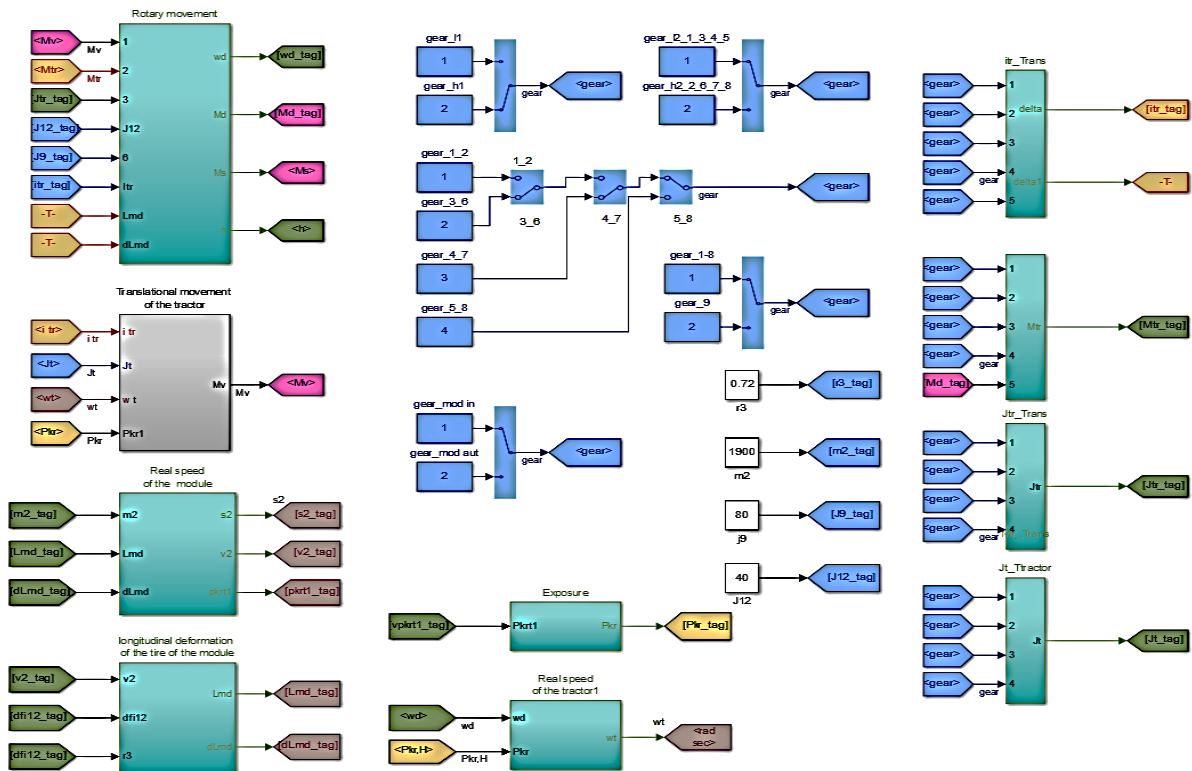


Рисунок 5 - Структурная схема МТА в форме прикладной программы Simulink

В третьем разделе «Программа и методика экспериментальных исследований» приводится методика проведения лабораторно-полевых и сравнительных полевых испытаний МТА на базе серийного трактора и трактора с технологическим модулем.

Лабораторно-полевые исследования проводились с целью изучения упругодемпфирующих свойств технологического модуля. Целью сравнительных полевых испытаний являлось определение эксплуатационных показателей МТА при выполнении технологических операций.

Для проведения лабораторно-полевых испытаний использовался современный измерительный комплекс, который включает в себя датчики, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), дополнительное оборудование и ноутбук.

**В четвертом разделе «Результаты теоретических и экспериментальных исследований»** приводятся результаты имитационного моделирования, лабораторно-полевых исследований, а также сравнительных испытаний.

Анализ результатов имитационного моделирования работы МТА с тяжелой дисковой бороной БДТ-7 в среде Simulink позволяет сделать следующие выводы. При одинаковых входных воздействиях со стороны орудия в виде случайного сигнала, на тракторе с технологическим модулем в результате его упругодемпфирующих свойств происходит сглаживание высокочастотных колебаний на навески трактора и высокочастотных колебаний момента сопротивления на входе в двигатель (рисунок 6 б) в сравнении с трактором без технологического модуля (рисунок 6 а).

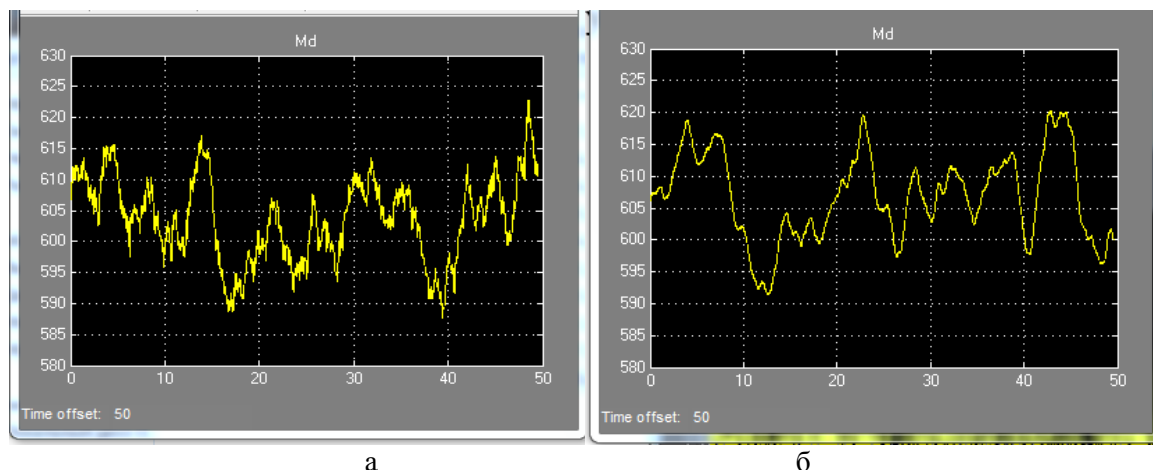


Рисунок 6 - Результаты моделирования момента сопротивления на входе в двигатель трактора МТЗ-82 в составе МТА при выполнении технологической операции дискование:

а – без технологического модуля; б – с технологическим модулем

Вывод о стабилизации момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем подтверждают и спектральные плотности, полученные по результатам моделирования в среде Simulink. Максимальные значения теоретических спектральных плотностей момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем (рисунок 7) при частотах 0...0,25 Гц в 3...3,5 раза меньше чем процесса момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля.

На рисунке 8 приведены теоретические и экспериментальные спектральные плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем, визуальное сравнение которых позволяет наглядно судить о совпадении основных частот спектральной плотности. Теоретические и экспериментальные реализации процессов хорошо согласуются и расхождение составляет в пределах 8...16%.

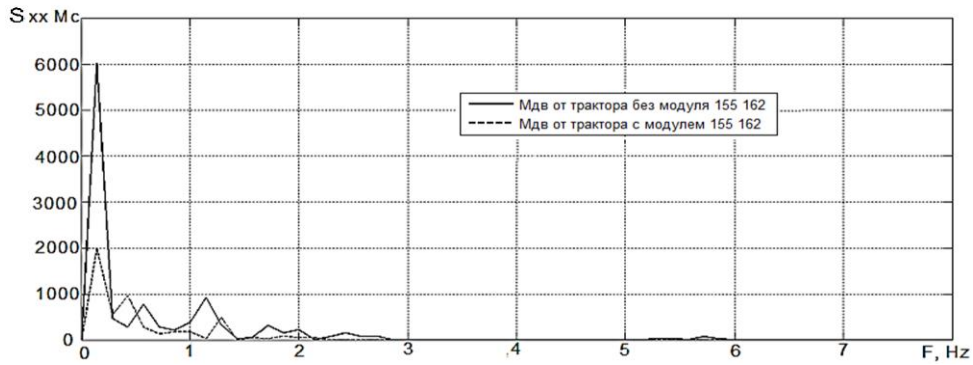


Рисунок 7 - Нормированные оценки спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель по результатам моделирования работы трактора МТЗ-82 при выполнении МТА технологической операции дискование (БДТ-7):

\_\_\_\_\_ - без технологического модуля;  
 - - - - - с технологическим модулем.

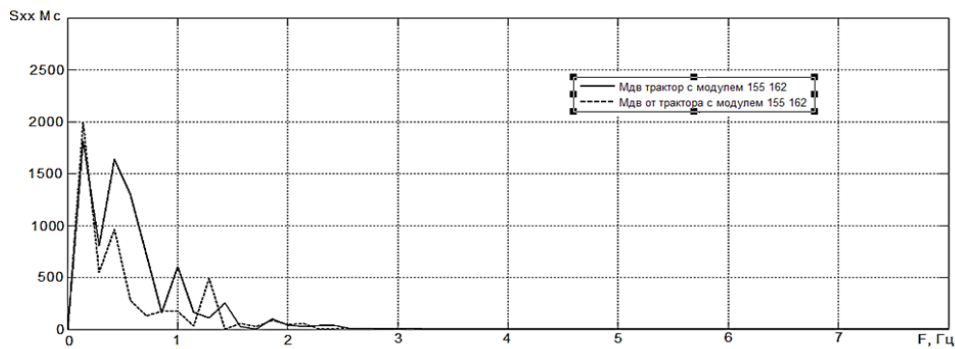


Рисунок 8 - Нормированные оценки спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора МТЗ-82 с технологическим модулем при выполнении МТА технологической операции дискование:

\_\_\_\_\_ - по результатам моделирования;  
 - - - - - по экспериментальным данным.

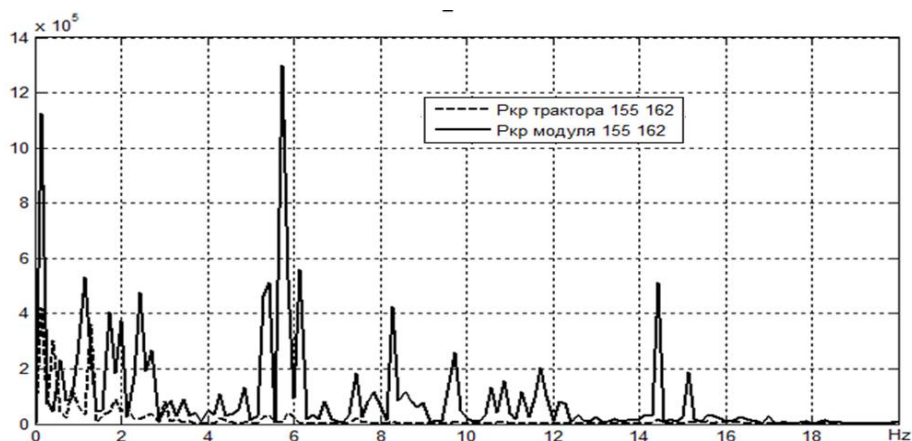


Рисунок 9 - Оценки спектральной плотности тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески в горизонтальной плоскости:

\_\_\_\_\_ - технологического модуля;  
 - - - - - трактора

Анализ результатов лабораторно-полевых исследований МТА с тяжелой

дисковой бороной БДТ-7 позволяет сделать следующие выводы (рисунок 9). Спектральная плотность тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески технологического модуля в горизонтальной плоскости имеет несколько диапазонов определяющих частот: 0...0,5 Гц, 0,5...1,5 Гц, 1,5...3,0 Гц, 3,0...5,5 Гц, 5,5...6,5 Гц, 7,0...9,0 Гц, 9,0...10,0 Гц, 11...12 Гц и 14,5...15,5 Гц. Максимальные значения спектральной плотности тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора в горизонтальной плоскости находится в области низких частот 0...3,0 Гц и более высоких частот 5,5...6,5 Гц.

Максимальные значения спектральной плотности тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора в горизонтальной плоскости при частотах 0...0,25 Гц в 2,5 раза меньше чем на навеске технологического модуля. Значения спектральной плотности тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески трактора снижается и для других частот и практически имеет небольшую энергию по сравнению с спектральной плотностью тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески технологического модуля в горизонтальной плоскости со стороны орудия. Это говорит о стабилизации горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора и подтверждает гипотезу о наличии упругодемпфирующих свойств технологического модуля.

Вывод о стабилизации горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора при использовании технологического модуля подтверждают и нормированные корреляционные функции (рисунок 10). Время спада корреляционной функции горизонтальной составляющей тягового усилия на навеске трактора уменьшается в шесть раз и составляет 1,0 с, в то время как на навеске технологического модуля составляет 0,17 с, то есть высокочастотная составляющая в 6,0 Гц, имеющаяся в спектре усилия на навеске модуля на навеске трактора отсутствует.

Проведенный анализ экспериментальных данных методами статистической динамики подтверждает, что технологический модуль служит упругодемпфирующим элементом, воспринимающим на себя наиболее существенную часть колебаний, возникающих в результате взаимодействия рабочего орудия с почвой.

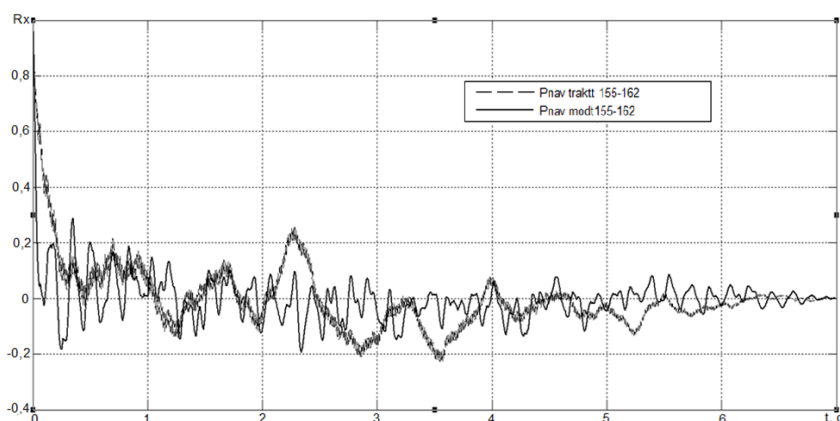


Рисунок 10 - Нормированные оценки корреляционной функции тягового усилия, действующего на нижнюю ось механизма навески в горизонтальной плоскости:

- \_\_\_\_\_ - технологического модуля;
- - трактора

Сравнительные полевые испытания МТА показали, что повышение чистой

производительности пахотного агрегата на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составило 25,0 % в сравнении с пахотным агрегатом на базе трактора МТЗ-82 (чистая производительность МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем - 0,95 га/ч). Снижение погектарного расхода топлива МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составило 13,9% в сравнении с трактора МТЗ-82 (погектарный расход топлива МТА на базе трактора с технологическим модулем - 13,6 кг/га).

**В пятом разделе «Технико-экономическая оценка»** приводятся результаты расчета экономической эффективности применения разработанной конструкции технологического модуля для трактора МТЗ-82 при его работе в составе пахотного агрегата. Годовой экономический эффект составляет в сумме 33,33 тыс. руб. на один МТА, срок окупаемости капитальных вложений – 2,64 года.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. В результате обзорных исследований установлено, что заложенный резерв мощности двигателя энергонасыщенных трактор может быть реализован в силу тяги двумя основными вариантами: путем балластирования трактора или присоединением к трактору технологического модуля, который позволяет повысить тяговое усилие за счет реализации резерва мощности через дополнительный ведущий мост.

2. Проведенные теоретические изыскания позволили обосновать компоновку модульного построения МТА для энергонасыщенных трактора класса 1,4 с технологическим модулем и разработать функциональную схему, которая обеспечит согласованную кинематическую и силовую передачу полной мощности двигателя, маневренность и агрегатирование полного комплекса сельскохозяйственных машин для универсально пропашных тракторов двух тяговых классов 1,4 и 2.

3. Разработан экспериментальный образец технологического модуля для модульного построения МТА на базе универсально-пропашного энергонасыщенного трактора тягового класса 1,4 в виде технологического модуля с ведущими колесами, обеспечивающего совмещение увеличения тягового усилия трактора и снижения колебаний внешней нагрузки, при уменьшении удельного расхода топлива. Оптимальные значения коэффициента окружной жесткости шины ведущих колес технологического модуля для трактора тягового класса 1,4 составляет 120000 Нм/рад и коэффициента продольной деформации шины ведущих колес технологического модуля составляет 180000 Н/м, коэффициенты демпфирования шины ведущих колес технологического модуля не имеют явно выраженных оптимумов. Значения коэффициентов соответствуют характеристикам шины 15,5-38 Ф-2АД при давлении 0,08 МПа.

4. Предложенная в работе методика по определению мощности двигателя трактора тягово-энергетической концепции и рационального веса технологического модуля, позволила определить, что для использования трактора в двух смежных тяговых классах необходимо обеспечить энергонасыщенность трактора с технологическим модулем такую же как у трактора в данном тяговом классе без модуля (1,59...1,65 кВт/кН), а сам трактор, к которому подсоединяется технологический модуль должен обладать энергонасыщенностью (2,0...2,41 кВт/кН).

5. В результате разработки и исследования математической модели МТА на ба-



зе трактора с технологическим модулем получены спектральные плотности процессов нагружения навески и полуосей трактора, которые показали, что за счет применения технологического модуля их амплитудные максимумы могут быть снижены более чем в 2,5...3 раза и сдвинуты в более низкую область частот до 0...2,5 Гц.

6. Имитационное моделирование в программе Simulink среды Matlab позволило получить спектральные плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем. Установлено, что максимальные значения спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем при частотах 0...0,25 Гц в 3...3,5 раза меньше максимальных значений спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля. Также значения спектральной плотности момента сопротивления на входе в двигатель трактора с технологическим модулем снижается и для других частот и практически имеют небольшую энергию по сравнению с спектральной плотностью момента сопротивления на входе в двигатель трактора без технологического модуля. Проведенные в работе изыскания подтвердили гипотезу о наличии упругодемпфирующих свойств технологического модуля.

7. Результаты лабораторно-полевых испытаний подтвердили адекватность теоретической модели и доказали, что применение технологического модуля с ведущими колесами оказывает существенное влияние на стабилизацию режима нагружения трактора. При максимальной спектральной плотности процесса нагружения навески технологического модуля при частотах 5...6,5 Гц и 14,5...15,5 Гц максимальная спектральная плотность дисперсии процесса нагружения навески трактора наблюдается при частотах 0...2 Гц. Время спада корреляционной функции горизонтальной составляющей усилия на навеске трактора увеличилось в 6 раз и составило 1,0 с, в то время как на навеске технологического модуля составляет 0,17 с и время спада корреляционной функции крутящего момента на полуоси трактора увеличилось до 0,6...0,8 с, в то время как на полуоси технологического модуля составляет 0,07 с.

8. Сравнительные полевые испытания МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем и МТА на базе трактора МТЗ-82 без технологического модуля показали, что применение технологического модуля с трактором МТЗ-82 дает повышение производительности пахотного агрегата на 25,0% (чистая производительность МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составила 0,95 га/ч) и снижение погектарного расхода топлива на 13,9% (погектарный расход топлива МТА на базе трактора МТЗ-82 с технологическим модулем составил 13,6 кг/га).

9. Оценка экономической эффективности показала, что применение технологического модуля позволяет получить годовой экономический эффект 33330 руб. на один МТА при выполнении вспашки и срок окупаемости дополнительных капитальных вложений составит 2,64 года.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК**

1. Осиненко П.В. Усовершенствованная измерительная система для наземно-транспортных средств / П.В. Осиненко, В.А. Воронин, М.В. Сидоров // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2012. – №1. – С.27 – 29.

2. Кутьков Г.М. Тяговый расчет трактора тягово-энергетической концеп-

ции / Г.М. Кутьков, М.В. Сидоров // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – №4. – С.13 – 18.

3. Кутьков Г.М. Теория и расчет полноприводного трактора / Г.М. Кутьков, А.А. Соловечик, М.В. Сидоров // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. – №2. – С.8 – 14.

4. Сидоров М.В. Упругодемпфирующие свойства транспортно-технологического модуля в составе сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата / М.В. Сидоров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – №10-2 (41). – С.119 – 121.

5. Кутьков Г.М. Исследование демпфирующих свойств транспортно-технологического модуля сельскохозяйственного трактора [Электронный ресурс] / Г.М. Кутьков, В.Н. Сидоров, М.В. Сидоров // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №2. – С. 197. – Режим доступа: URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20808>

### **Публикации в других изданиях**

6. Сидоров В.Н. Повышение производительности машинно-тракторного агрегата применением промежуточного энергетического модуля / В.Н. Сидоров, О.В. Локтик, М.В. Сидоров // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – Брянск: Изд-во БГСХА, 2002. – С. 109 – 112.

7. Сидоров М.В. Обеспечение оптимальных режимов загрузки тракторного двигателя применение ЦАП-АЦП / М.В. Сидоров, Д.А. Безик, И.С. Лабузько // Повышение производительности и эффективности использования машинно-тракторного парка и автотранспорта. – С-Пб.: Изд-во С-ПбГАУ, 2002. – С. 205 – 207.

8. Сидоров М.В. Моделирование энергетических показателей двигателя тягово-приводного агрегата при вероятностной нагрузке / М.В. Сидоров // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – Брянск: Издательство БГСХА, 2003. – С. 97 – 102.

9. Сидоров М.В. Повышение производительности машинно-тракторного агрегата применением ведущих колес сельхозмашины / М.В. Сидоров, В.А. Воронин // Молодые ученые – аграрной науке и производству. – Брянск: Издательство БГСХА, 2003. – С. 110 – 111.

10. Сидоров В.Н. Проблемы повышения эффективности использования трактора в составе сельскохозяйственного МТА / В.Н. Сидоров, М.В. Сидоров, В.А. Воронин // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 2-4 декабря 2003 г., т.1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – С. 235 – 237.

11. Сидоров В.Н. Повышение эффективности использования энергонасыщенного трактора в составе сельскохозяйственного МТА / В.Н. Сидоров, М.В. Сидоров [и др.] // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 7-9 декабря 2004 г., т.1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – С. 230 – 231.

12. Сидоров М.В. Формирование реализации внешней нагрузки как случайной функции / М.В. Сидоров // Прогрессивные технологии, конструкции и

системы в приборо - и машиностроении: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 6-8 декабря 2005 г., т.3. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 177 – 178.

13. Сидоров М.В. Методика исследования тягово-технологического модуля / М.В. Сидоров, В.А. Воронин, В.С. Федоров // Научно-технические технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции 5-7 декабря 2006г., т.3. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – С. 126 – 128.

14. Сидоров М.В. Моделирование работы трактора в среде simulink / М.В. Сидоров, А.А. Рогоза // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо - и машиностроении: Материалы региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 20-22 апреля 2007 г., т.1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – С. 163 – 164.

15. Сидоров М.В. Моделирование работы регулятора топливного насоса высокого давления в среде simulink / М.В. Сидоров, В.А. Воронин, И.В. Лисовский // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо - и машиностроении: Материалы региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 20-22 апреля 2007 г., т.1. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – С. 155 – 156.

16. Осиненко П.В. Динамическая модель модульного энергетического средства / П.В. Осиненко, М.В. Сидоров, Г.М. Кутьков, В.Н. Сидоров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2014. – №10 – 5. – С.187 – 193.

17. Сидоров, М.В. Измерительная система для исследования упруго-демпфирующих свойств транспортно-технологического модуля / М.В. Сидоров // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – №10-5. – С.187 – 193.

18. Кутьков Г.М. Расчет мощности двигателя и веса трактора тягово-энергетической концепции [Электронный ресурс] / Г.М. Кутьков, В.Н. Сидоров, М.В. Сидоров // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2016. – №2 (6). – С.37 – 46. – Режим доступа: URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/0d44dc9c8f00efabcb16c065f294ff41.pdf> .

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, ученому секретарю. Телефон (473) 224-39-39, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Сидоров Максим Владимирович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА  
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДУЛЯ С  
ВЕДУЩИМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ ДЛЯ ТРАКТОРА ТЯГОВОГО  
КЛАССА 1,4

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 30.03.2017. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.  
Усл.п.л. 1,25. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ №66

Отпечатано в Редакционно-издательском отделе  
Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана  
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87